



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Jochen Niklas Heitmann

Analyse von echtzeitfähigem Ethernet und Konzeption von Anwendungen in der Flugzeugkabine

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und
Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive
and Aeronautical Engineering*

Jochen Niklas Heitmann
Analyse von echtzeitfähigem Ethernet und
Konzeption von Anwendungen in der
Flugzeugkabine

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Mechatronik
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
an der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer : Prof. Dr.-Ing. Mark Wiegmann
Zweitprüfer : Prof. Dr. rer. nat. Thomas Lehmann

Abgabedatum: 22.05.2020

Jochen Niklas Heitmann

Thema der Bachelorarbeit

Analyse von echtzeitfähigem Ethernet und Konzeption von Anwendungen in der Flugzeugkabine

Stichworte

Echtzeit, Ethernet, Time-Triggered Ethernet, TTEthernet, Time-Sensitive-Networking, TSN, Zweidraht-Ethernet, SPE, AFDX

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit echtzeitfähigen Ethernet Standards. Hierbei wird untersucht, ob Time-Triggered Ethernet und Time Sensitive Networking Anwendung in der Flugzeugkabine finden könnten. Diese gelten als vielversprechende Alternativen zu herkömmlichen Bussystemen und könnten helfen Ethernet auch in der Luftfahrt als Standard zu implementieren. Es werden beide Standards untersucht und das mögliche Potenzial in der Luftfahrt wird diskutiert. Darüber hinaus werden die Umrüstungen einer Passenger Service Unit (PSU) und des Rauchmeldesystems auf TTEthernet als Beispielanwendungen konzipiert.

Jochen Niklas Heitmann

Title of the paper

Analysis of real-time Ethernet and conception of applications within the aircraft cabin

Keywords

real-time, Ethernet, Time-Triggered Ethernet, TTEthernet, Time-Sensitive-Networking, TSN, Single-Pair-Ethernet, SPE, AFDX

Abstract

This paper addresses realtime Ethernet standards. In this case Time-Triggered Ethernet and Time Sensitive Networking will be examined for a potential use within the aircraft cabin. Both these standards are regarded to be the most promising alternative for conventional bussystems and could help implementing Ethernet as aviation standard. Therefore these standards will be examined closely and the potential for a possible usage within aviation will be debated. Furthermore concepts will be designed to change a Passender Service Unit (PSU) and the smoke detection system to a TTEthernet basis.



FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK
DEPARTMENT FAHRZEUGTECHNIK UND FLUGZEUGBAU
Prof. Dr.-Ing. Mark Wiegmann

Aufgabenstellung Bachelorarbeit

Name: Jochen Heitmann

Titel: Analyse von echtzeitfähigem Ethernet und Konzeption von Anwendungen in der Flugzeugkabine

Hintergrund: Die Automatisierung in allen Zweigen der Industrie schreitet immer weiter voran. Ethernet wird immer öfter als Alternative zu klassischen Feldbussystemen angeführt. In der Luftfahrt ist mit AFDX™ (bzw. ARINC664 P7) bereits ein echtzeitfähiges Ethernet Protokoll in Betrieb. Mit Time Sensitive Networking (TSN) und Time-Triggered Ethernet (TTEthernet) gibt es zwei weitere echtzeitfähige Ethernet Protokolle, die eine Alternative für die Anwendung in der Flugzeugkabine sein könnten. Gleichzeitig schreitet die Standardisierung von Zweidraht-Ethernet voran. In einer möglichen Kombination dieser Technologien liegt eventuell die Lösung für ein effizientes universelles Datennetzwerk in der Flugzeugkabine.

Ziel der Arbeit: Im Rahmen der zu erstellenden Bachelorarbeit ist zunächst ein Überblick über Ethernet-basierte Protokolle zu schaffen, welche Anwendung in der Flugzeugkabine finden könnten. Hervorzuheben sind dabei besonders die Technologien TTEthernet und TSN.

Der aktuelle Stand der Technik, dieser Ethernet-basierten Protokolle, ist zu ermitteln. Weiterhin ist zu ermitteln, welche Anforderungen der Anwendungsfall Flugzeugkabine an diese Protokolle stellt und ob diese damit erfüllbar sind. Die Untersuchung soll sich dabei nicht nur auf die Protokolle, sondern auch auf die physikalische Netzwerkschicht beziehen. Dabei sind die speziellen Integrationsrandbedingungen in der Flugzeugkabine zu berücksichtigen, z. B.: Bauraum / -volumen, Masse, Industrialisierbarkeit, Wartbarkeit, Wirtschaftlichkeit. Ziel ist eine argumentierte Aussage zum Potenzial der untersuchten Technologien für den Anwendungsfall Flugzeugkabine.

Zu bearbeitende Aspekte:

- Anforderungen zusammenstellen für den Anwendungsfall Netzwerktechnik in der Flugzeugkabine
- Notwendige Grundlagen über TSN und TTEthernet zusammenstellen
- Ähnlichkeiten und Unterschiede von TTEthernet und TSN recherchieren und erläutern
- Diskussion der Kombinationsfähigkeit der untersuchten Protokolle mit Zweidraht-Ethernet Lösungen
- Potenzial der untersuchten Technologien für den Anwendungsfall Flugzeugkabine herausarbeiten auch unter Berücksichtigung existierender Produkte für sicherheitskritische Anwendungen in anderen Industrien
- Konzeption von Beispielanwendungen, um getroffene Aussagen zu untermauern.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	11
1 Einführung und Motivation	14
2 Analyse der Anforderungen	16
2.1 Zertifizierungs-Spezifikationen	17
2.2 Umsetzung der Richtlinien zur Zertifizierung	18
2.3 Anwendungsbezogene Anforderungen	20
2.4 Zusammenfassung	22
3 Stand der Technik	23
3.1 Einführung in Netzwerktechnik und Ethernet	23
3.1.1 Grundlagen der Netzwerktechnik	23
3.1.2 Geschichte des Ethernet	29
3.2 AFDX™	30
3.2.1 Grundlagen	30
3.2.2 Nachrichtenklassen	32
3.2.3 AFDX Frame	32
3.3 Time Triggered Ethernet	34
3.3.1 Grundlagen	34
3.3.2 Nachrichtenklassen	39
3.3.3 TTEthernet Frame	41
3.4 Time Sensitive Networking	42
3.4.1 Grundlagen	42
3.4.2 Credit Based Shaping und Time Aware Shaping	43
3.4.3 Redundanz und Preemption	46
3.4.4 Nachrichtenklassen	47
3.5 Zwei-Draht Ethernet	49
3.5.1 Grundlagen	49

3.5.2	Standards der IP-basierten Kommunikation mit SPE	49
3.5.3	Normung der Steckgesichter und Steckervarianten	50
3.5.4	Switch Hardware	52
4	Vergleich und Bewertung	53
4.1	Ableich gegen die Anforderungen	53
4.1.1	Time Triggered Ethernet	54
4.1.2	Time Sensitive Networking	56
4.2	Zwei-Draht Ethernet	58
4.2.1	Kombinierbarkeit von TSN und SPE	61
4.2.2	Kombinierbarkeit von TTEthernet und SPE	61
4.3	Potenzial in der Luftfahrt	62
5	Konzeption von Beispielanwendungen	63
5.1	Findung und Auswahl von Anwendungen	63
5.2	Passenger Service Unit	66
5.2.1	Grundlagen	66
5.2.2	Mögliche Umsetzung	68
5.2.3	Ausblick	73
5.3	Rauchmeldesystem	75
5.3.1	Grundlagen	75
5.3.2	Mögliche Umsetzung	77
5.3.3	Ausblick	78
6	Zusammenfassung und Ausblick	79
	Literaturverzeichnis	85

Tabellenverzeichnis

2.1	Design Assurance Level (DAL) A bis E mit spezifizierten Auswirkungen und geforderten Ausfallwahrscheinlichkeiten [51]	19
2.2	Ausschnitt über die Aufteilung einzelner Kabinensysteme in ATA Kapitel [43]	21
2.3	Anforderungsliste	22
3.1	Schichtenmodell mit englischen und deutschen Bezeichnungen . . .	27
3.2	Angestrebte Umsetzung im Schichtenmodell visualisiert	28
3.3	Zulässige Werte der Bandwidth Allocation Gap (BAG) und die dazugehörigen implizierten Frequenzen [7]	32
3.4	Ausschnitt der wichtigsten Time Sensitive Networking (TSN) Standards [50]	43
4.1	Anforderungsliste	53
4.2	Auswertung von Time-Triggered Ethernet (TTEthernet) gegen die Anforderungen	56
4.3	Auswertung von TSN gegen die Anforderungen	58
5.1	Beispiele zur Einordnung verschiedener Funktionalitäten in der Kabine in die einzelnen Design Assurance Level (DAL) [51]	72

Abbildungsverzeichnis

2.1	Sicherheit hat mehrere Aspekte, die Unterschiede werden mit den englischen Bezeichnungen Safety und Security deutlich	16
2.2	Überblick der veröffentlichten Richtlinien und Ratschläge für die Entwicklung auf System und Komponenten Ebene (Europäische Dokumente links, US-amerikanisches Pendant rechts) [51]	18
3.1	Prinzip der Datenübertragung im Simplex Betrieb	25
3.2	Prinzip der Datenübertragung im Halbduplex Betrieb	26
3.3	Prinzip der Datenübertragung im Vollduplex Betrieb	26
3.4	Netzwerkarchitektur von Direktverdrahtung unter ARINC-429 (links) und Switched Ethernet unter ARINC-664P7 (rechts) im Vergleich (Schemadarstellung)[37]	30
3.5	Redundante Hardwareauslegung mittels zweier Netzwerke [7]	31
3.6	Aufbau eines Ethernet-Frame [7]	33
3.7	Switched TTEthernet Architektur	35
3.8	Sicherheitskritische TTEthernet Architektur in redundanter Auslegung der Switches und Virtual Link (VL)	36
3.9	Trotz Ausfall eines Switches ist das Netzwerk hier weiterhin funktionsfähig	36
3.10	Aussendung der Integration Frames von Synchronisation Master zu Compression Master [47]	37
3.11	Aussendung der neuen globalen Uhrzeit von Compression Master zu allen Synchronisation Master und Synchronisation Clients [47]	38
3.12	Darstellung des Drifts der lokalen Uhren und der Synchronisation [36]	39
3.13	Beispieldarstellung eines TTEthernet Datenfluss der drei Nachrichtenklassen [46]	40
3.14	Aufbau eines TTEthernet Frames und dessen Unterschiede zum Standard Ethernet Frame [44]	41
3.15	Visualisierung der Streckung von multiplen Frames auf einen längeren Zeitraum durch den Credit Based Shaper [34]	44

3.16	Visualisierung der Datenweiterleitung eines TSN-Switches nach den Prinzipien Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802.1AS und IEEE 802.1Qbv [16].	45
3.17	Visualisierung des Konfliktes von Best-Effort (BE) Datenverkehr (geringe Priorität - LP) und zeitkritischem Datenverkehr (hohe Priorität - HP). Von oben nach unten: Ungelöster Konflikt, Einsatz eines Guard Bands (Schutzzone), Preemption mit möglicher Unterbrechung nach 64 Byte [42]	47
3.18	Darstellung der Aufteilung der einzelnen Nachrichten nach Prioritätsklasse im Time Aware Shaping (TAS) (links höchste Priorität, rechts niedrigste Priorität) [33]	48
3.19	Erläuterung der Abkürzungen der Standards am Beispiel von 1000Base-T1	49
3.20	Steckgesichter und Steckervarianten nach IEC 63171-5, wie von Firma Weidmüller vorgestellt und vertrieben [49]	51
3.21	Steckgesichter und Steckervarianten nach IEC 63171-6, wie von Firma Harting vorgestellt und vertrieben [49]	51
3.22	Neu angekündigte SPE-Switches der Firma EKF für das Jahr 2020, mit Augenmerk auf AL5 (zweiter von links) und AL6 (zweiter von rechts) [49]	52
4.1	Die drei Nachrichtenklassen des TTEthernet [6]	54
4.2	Überblick über Single-Pair Ethernet (SPE) Standards und deren Zusammenhänge zwischen Leitungslänge und Bandbreite (Grün: Bereits in IEEE 802.3; Gelb: Noch in der Normungsphase) [49]	59
5.1	Überblick über Komponenten und deren Vernetzung des Cabin Inert-communication Data System (CIDS) [24]	65
5.2	Einzelne Passenger Service Unit aus der Airbus A320-Familie [22]	66
5.3	Topologie der beschriebenen Komponenten, welche die Verbindung jeder Passenger Service Unit (PSU) sichern	67
5.4	Topologie nach Umbau auf eine Switched Ethernet Architektur	68
5.5	Umsetzung mit wenigen Switches und dafür multiplen langen Leitungen	69
5.6	Umsetzung mit mehreren Swtches und dafür kurzen Leitungen	70
5.7	Mögliche Vernetzung der PSUs einer Airbus A320neo mit 32 Sitzreihen und dem TTE Switch Module A664 Pro [3]	71
5.8	Mögliche Aufteilung der Funktionen einer PSU auf die unterschiedlichen Nachrichtenklassen von TTEthernet	73
5.9	Kabinenbeleuchtung in der Nähe der PSU am Beispiel einer Airbus A380 Kabine [19]	74

5.10 Aktuelle Topologie des Rauchmeldesystems in der Kabine	76
5.11 Aktuelle Topologie des Rauchmeldesystems sowie der Löschanlage in den Frachträumen	76
5.12 Mögliche Topologie nach einer Umrüstung auf eine Switched TTEthernet Architektur	77
5.13 Einordnung des Rauchmeldesystems in die Nachrichtenklassen von TTEthernet	78

Abkürzungsverzeichnis

ACP	Area Call Panels
AFDX	Avionics Full Duplex Switched Ethernet
AIP	Attendant Indication Panels
ARINC	Aeronautical Radio Incorporated
ATA	Air Transport Association
AVB	Audio Video Bridging
BAG	Bandwidth Allocation Gap
BE	Best-Effort
CAN	Controller Area Network
CBS	Credit Based Shaping
CDT	Control Data Traffic
CIDS	Cabin Inertcommunication Data System
COTS	commercial off-the-shelf
CS	Certification Specification
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection
CT-ID	Critical Traffic ID
CT-Marker	Critical Traffic Marker
DAL	Design Assurance Level
DEU	Decoder Encoder Unit
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EUROCAE	European Organization for Civil Aviation Equipment
FAA	Federal Aviation Administration

FAP	Forward Attendent Panel
FCS	Frame Check Sequence
FEDC	Fire Extinguishing Data Converter
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFE	Inflight Entertainment
ISO	International Organization for Standardization
LAA	Locally Administered Address
LRU	Line-Replaceable-Unit
MAC	Media Access Control
OSI	Open Systems Interconnection
PISA	Passenger Interface Supply Adapter
PoDL	Power over Data Line
PoE	Power over Ethernet
PSU	Passenger Service Unit
RC	Rate-Constrained
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
SAE	Society of Automotive Engineers
SDF	Smoke Detection Function
SPE	Single-Pair Ethernet
TAS	Time Aware Shaping
TDMA	Time-Division-Multiple-Access
TN	Teilnehmer
TSN	Time Sensitive Networking
TT	Time-Triggered
TTEthernet	Time-Triggered Ethernet
UAA	Universally Administered Address

VL	Virtual Link
VoIP	Voice over IP

1 Einführung und Motivation

In vielen Industriezweigen und Computer Netzwerken ist Ethernet (nach IEEE 802.3) bereits als zuverlässiger Standard etabliert [50]. Immer häufiger wird Ethernet deshalb auch als Alternative zu klassischen Feldbussystemen betrachtet. Die Gründe hierfür liegen auf der Hand. Ethernet bietet im Vergleich zu den meisten Bussystemen ein enormes Plus an Bandbreite. Zusätzlich sind kostengünstigere commercial off-the-shelf (COTS) Komponenten im Markt verfügbar [46]. Etabliert man ein reines Ethernet System, entfallen beispielsweise Kompatibilitätsprobleme verschiedener Bussysteme untereinander. Des Weiteren sinken bei den Betreibern die Gesamtkosten des Betriebes (Total cost of ownership), da nur noch ein reines Ethernet Netzwerk zu betreiben und zu warten ist. Es bleibt jedoch ein Nachteil vorhanden, Ethernet nach IEEE 802.3 ist per se nicht echtzeitfähig.

In der Luftfahrt sind bisher viele verschiedene Bussysteme, innerhalb eines Flugzeuges, im Einsatz. Darunter auch Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX)TM, ein echtzeitfähiges Ethernet Protokoll, welches aber bisher nur in der Avionik Anwendung findet. Durch diese Vielzahl unterschiedlicher Netzwerkarchitekturen, welche oft nur für Nischenanwendungen genutzt werden, steigt der Preis der benötigten Hardware und Software immens [28]. Daher haben Flugzeughersteller und deren Kunden ein Interesse daran, dass durch Einsatz von Echtzeit-Ethernetnetzwerken die Anzahl der Bussysteme in der Flugzeugkabine reduziert wird und somit Kosten bei Entwicklung, Herstellung und Wartung sinken. Mit der Einführung von Echtzeit-Ethernet als Standard in der Kabine, kann eine einheitliche Technologie genutzt werden, welche etabliert, getestet und verifiziert ist und zahllose COTS Komponenten verwendet. Zwei erfolgversprechende Echtzeit-Ethernetprotokolle, die für dieses Anwendungsgebiet tauglich scheinen, heißen Time-Triggered Ethernet (TTEthernet) und Time Sensitive Networking (TSN). Durch die aktuellen Entwicklungen im Bereich von Zweidraht Ethernet - auch Single-Pair Ethernet (SPE) genannt - liegt es nahe, die zu betrachtenden Echtzeit-Ethernetprotokolle in einer Kombination mit Single-Pair Ethernet als physikalische Übertragungsschicht nutzen zu wollen und so Gewicht und Kosten einzusparen.

Diese Arbeit führt in die Thematik der genannten Echtzeit-Ethernetprotokolle ein und zeigt, ob und wie eine dieser Technologien für die Anwendung in der Flugzeugkabine geeignet ist.

Dazu werden, in Kapitel 2, die Anforderungen des Einsatzgebietes Flugzeugkabine entsprechend analysiert und dargestellt. Hierbei wird besonderes auf die Eigenheiten von lufttüchtigen Systemen eingegangen.

Kapitel 3 frischt die Grundlagen der Netzwerktechnik auf, welche zum Verständnis der Arbeit von Nöten sind. Anschließend wird AFDX, als bereits umgesetzte Echtzeit Ethernetlösung in der Luftfahrt, vorgestellt. Dies ist auch wichtig, da Teile von TTEthernet auf AFDX basieren.

Entsprechend wird danach in TTEthernet und TSN eingeführt. Hierbei liegt der Fokus hauptsächlich auf der Umsetzung von Determinismus der jeweiligen Technologie, da dies gegenüber Standard Ethernet deren Alleinstellungsmerkmal darstellt. Zuletzt wird Zwei-Draht Ethernet (Single-Pair Ethernet - SPE) als mögliche physikalische Übertragungsschicht vorgestellt.

Kapitel 4 gleicht anschließend das Wissen aus Kapitel 3 mit den aufgestellten Anforderungen aus Kapitel 2 ab.

In Kapitel 5 werden mit der Passenger Service Unit und dem Rauchmeldesystem zwei Beispielanwendungen, auf eine Umsetzung mit TTEthernet hin untersucht. Abschließend werden in Kapitel 6 die Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick gegeben, bezüglich Fragestellungen, welche sich aus dieser Arbeit weiterhin ergeben.

2 Analyse der Anforderungen

In diesem Kapitel werden die Anforderungen, welche der Anwendungsfall der Flugzeugkabine an Echtzeit-Ethernetnetzwerke stellt, aufgeführt und analysiert.

Betrachtet wird hier nur die Sicherheit im Bezug auf Systemausfälle (Safety)(siehe Abbildung 2.1). In der heutigen Zeit spielt jedoch Cyber-Kriminalität eine so wichtige Rolle wie nie. Deshalb sollte auch die Sicherheit gegen Eindringen und Manipulation von außen betrachtet werden (Security). Das würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, sollte aber nicht unerwähnt bleiben und muss bei einer praktischen Umsetzung zwingend betrachtet werden. Bei der Analyse dieser Thematik sei auf bestehende Arbeiten und Veröffentlichungen verwiesen, welche sich mit der Informationssicherheit von TTEthernet und TSN befassen.

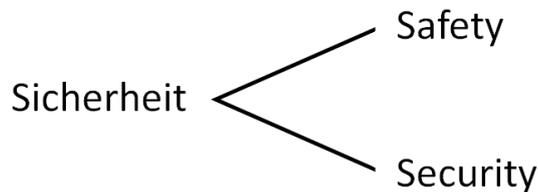


Abbildung 2.1: Sicherheit hat mehrere Aspekte, die Unterschiede werden mit den englischen Bezeichnungen Safety und Security deutlich

Da sich diese Arbeit mit Echtzeitfähigkeit und Determinismus in Ethernet Netzwerken befasst, werden die folgenden Anforderungen vorausgesetzt und im Verlauf dieses Kapitels nicht mehr separat ausgeführt. Deren Bedeutungen sind jedoch im Kapitel Stand der Technik erläutert.

- Das System soll ein deterministisches Zugriffsverfahren aufweisen.
- Das System soll in der Lage sein, Nachrichten mit unterschiedlichen Zeitanforderungen zu übertragen, um das Anwendungsspektrum zu maximieren.

Eigenheiten im Bezug auf den Nachweis der Lufttüchtigkeit und deren Umsetzung werden in den Abschnitten 2.1 und 2.2 erläutert. Darüber hinaus ergeben sich anwendungsbezogenen Anforderungen, welche im Abschnitt 2.3 analysiert werden, um zu verstehen, welche der im Folgenden betrachteten Technologien für den Einsatz in der Flugzeugkabine geeignet sind.

2.1 Zertifizierungs-Spezifikationen

Passagierflugzeuge dürfen erst in den nationalen und internationalen Linienbetrieb eintreten, wenn ein Zertifizierungsprozess durchlaufen und bestanden wurde. Damit Flugzeuge von den entsprechenden Zertifizierungsbehörden zugelassen werden, müssen gewisse Richtlinien - bei Entwicklung und Bau - erfüllt sein. Welche Richtlinien hier beispielsweise Beachtung finden, wird in diesem Abschnitt ausgeführt.

Die European Union Aviation Safety Agency (EASA) gibt mit der Certification Specification (CS)-25 einen Richtlinien Katalog, für die Bauartzulassung von großen Passagierflugzeugen, heraus. Dieser Richtlinien Katalog definiert die zu erfüllenden Anforderungen, sodass ein System als lufttüchtig eingestuft werden kann. So existieren innerhalb der CS-25 unter anderem Richtlinien zur Brandverhütung. Diese Kriterien sind beispielsweise in CS 25.869 bzw. CS 25.831(c) und CS 25.863 festgelegt [9].

Die CS-25 der EASA ist dabei identisch zur FAR25 der US-amerikanischen Federal Aviation Administration (FAA). Diese Art der Kooperation zwischen EASA und FAA existiert in einer Vielzahl von Dokumenten. Eine Übersicht über die betrachteten Dokumente zeigt Abbildung 2.2.

Die in CS-25 enthaltenen Richtlinien werden auch als Soft-Law bezeichnet. Damit sind diese Richtlinien gesetzlich nicht bindend, spiegeln aber eine getroffene Übereinkunft dar, welche Spezifikationen ein Passagierflugzeug aufweisen soll um den Zertifizierungsprozess erfolgreich abzuschließen.

Zudem beinhaltet die CS-25 auch Ratschläge zur Umsetzung der geforderten Spezifikationen. Diese sind im zweiten Buch der CS-25 zu finden, auch bekannt unter dem Namen AMC-25 (Acceptable Means of Certification). Analog dazu hat Society of Automotive Engineers (SAE) mit ARP 4754 und ARP 4761 ähnliche Leitlinien veröffentlicht.

Kernforderung ist immer der Nachweis der Lufttüchtigkeit der eingebauten Hardware und Software. Auf welchem Weg dieser Nachweis erbracht wird ist nicht bindend vorgeschrieben. Ein Festhalten an den Vorschlägen der AMC-25 kann im Zweifelsfall aber den Zertifizierungsprozess beschleunigen.

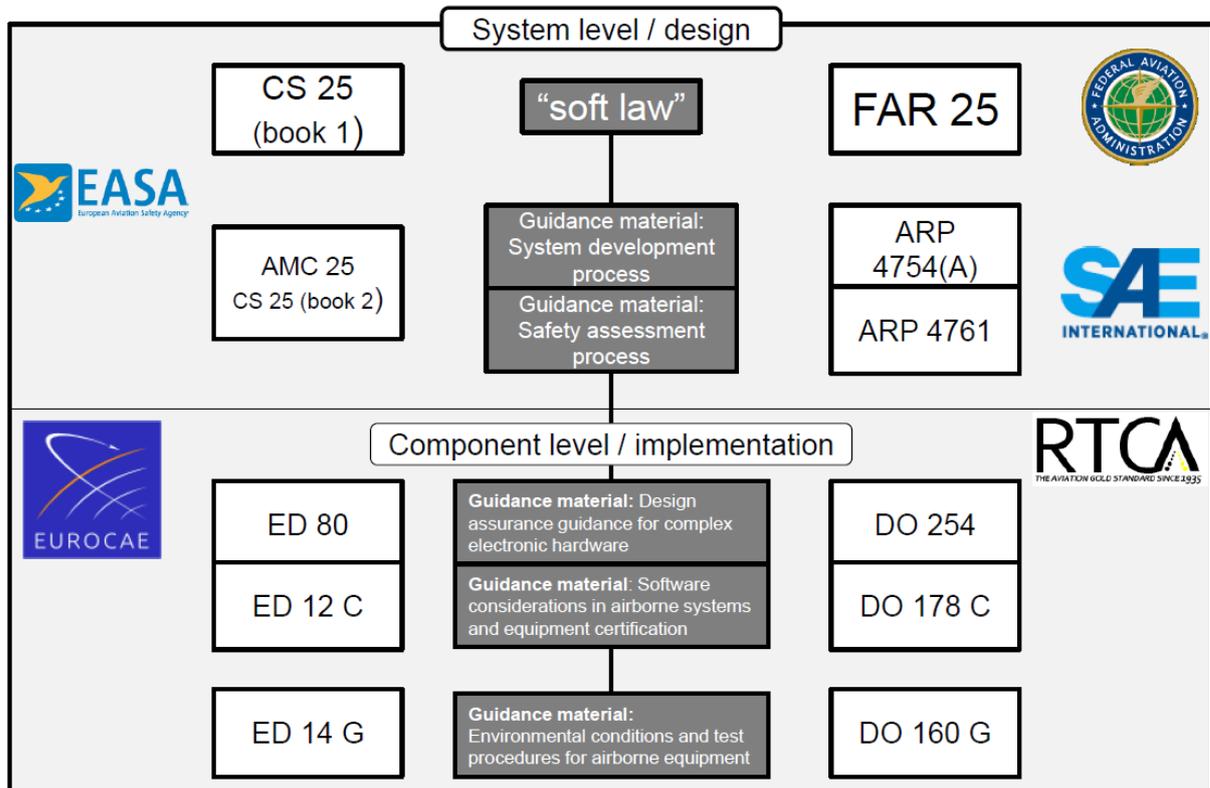


Abbildung 2.2: Überblick der veröffentlichten Richtlinien und Ratschläge für die Entwicklung auf System und Komponenten Ebene (Europäische Dokumente links, US-amerikanisches Pendant rechts) [51]

2.2 Umsetzung der Richtlinien zur Zertifizierung

In AMC-25 (CS-25 Book 2) werden fünf Level an Kritikalität eingeführt (siehe Tabelle 2.1). Diese geben unter anderem die Auswirkung von Fehlern wieder. Hierbei beginnt die Skala mit Level A und höchster Kritikalität, wobei Fehler den Verlust von Menschenleben oder des Flugzeuges zu Folge haben können. Die Skala endet bei Level E und somit der niedrigsten Kritikalität. Fehler dieses Levels haben keinerlei

Auswirkung auf die Sicherheit des Fluges.

Mit jedem Level ist eine sogenannte Target System Failure Rate verbunden. Diese beschreibt wie hoch die Wahrscheinlichkeit sein darf, dass das System einen Ausfall erfährt.

Diese Kategorisierung wird durchgeführt um sicherzustellen, dass sicherheitskritische Systeme mit der nötigen Sorgfalt entwickelt werden [1]. In diesen Dokumenten liegt der Fokus auf der System Ebene bzw. dem Design.

Classification & Resulting DAL	Qualitative Probability	Quantitative Probability [1/fh]	Effect on		
			Flight Crew	Occupants	Aircraft
No Safety Effect DAL E	(no requirement – “frequent”)	$\geq 10^{-2}$	no effect	no effect	no effect on operational capabilities or safety
Minor DAL D	Probable	$10^{-2} - 10^{-5}$	slightly increased work load	physical discomfort	slightly reduced functions or safety margins
Major DAL C	Remote	$10^{-5} - 10^{-7}$	significantly increased work load, physical discomfort	physical distress, injuries possible	significantly reduced function
Hazardous DAL B	Extremely Remote	$10^{-7} - 10^{-9}$	heavy work load physical distress	(few) serious (even fatal) injuries possible	largely reduced function
Catastrophic DAL A	Extremely Improbable	$\leq 10^{-9}$	unable to control aircraft (fatalities)	multiple fatalities possible	loss of aircraft possible – “hull loss”

Tabelle 2.1: Design Assurance Level (DAL) A bis E mit spezifizierten Auswirkungen und geforderten Ausfallwahrscheinlichkeiten [51]

Auf Komponenten Ebene bzw. bei der Implementierung geben die folgenden Dokumente hilfreiche Leitlinien vor.

Ein anerkannter Weg die Richtlinien aus CS-25 / FAR25 bei der Entwicklung umzusetzen, ist unter Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA) DO-178C und DO-254 bzw. European Organization for Civil Aviation Equipment (EUROCAE) ED-12C und ED-80 erarbeitet worden. ED-80 bzw. DO-254 gibt Ratschläge zur Entwicklung von elektrischer und elektronischer Hardware, wohingegen ED-12C bzw. DO-178C Ratschläge zur Entwicklung von Software bereithält. Dabei geben diese Dokumente weniger das Endergebnis vor, als dass sie eine Prozessspezifikation des Entwicklungsprozesses widerspiegeln [1].

Wie auch jedes andere elektrische System, muss die zu wählende Hardware verschiedenen Umwelteinflüssen gewachsen sein. Dazu gehören beispielsweise:

- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
- Beständigkeit gegen elektrostatische Entladung (ESD)
- Magnetische Auswirkung von der Hardware auf die Umgebung und umgekehrt
- Verträglichkeit von Überspannung durch Spannungsspitzen
- Beständigkeit gegen induzierte Spannung
- Wasser- und Staubdichtigkeit
- Luftdruckänderungen
- Vibrationsbeständigkeit
- Widerstand gegen hohe Temperaturschwankungen

Wie diese Kriterien, im Bezug auf die Widerstandsfähigkeit der Hardware gegenüber Umwelteinflüssen, erfüllt werden können und wie entsprechende Prüfungen dafür aussehen können, wird in der RTCA DO-160G bzw. EUROCAE ED-14 ausgeführt.

2.3 Anwendungsbezogene Anforderungen

Die anwendungsbezogenen Anforderungen können je nach Anwendungsfall variieren. Daher stellt diese Auflistung keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die folgenden Anforderungen spiegeln vielmehr ein universelles Spektrum wieder und sind entsprechend repräsentativ.

In der Luftfahrt sind viele Bauteile als Line-Replaceable-Unit (LRU) ausgelegt. Dies sind Bauteile oder Baugruppen, die ohne größeren Aufwand vor Ort ausgetauscht werden können. Sie sind aber dennoch dem übergeordneten Bussystem, oder hier dem Ethernet-Netzwerk, zugeordnet. Eine weitere Anforderung ist somit die Fähigkeit, nach dem Tausch einer LRU diese zu erkennen, ohne dass eine Neukonfiguration des Netzwerks vonnöten ist.

Der Bauraum in Flugzeugen ist bekanntlich begrenzt. Zudem spielt die Masse einer zu verbauenden Technologie, besonders in der Luftfahrt, eine entscheidende Rolle. Daher muss die zu wählende Technologie Hardware unterstützen, welche in das vorhandene Bauvolumen passt. Weiter sollte die zu wählende Technologie mit der gleichen Masse aufwarten wie die bisherige Lösung oder diese noch unterbieten.

Das Gesamtsystem Flugzeug teilt sich in mehrere Teilsysteme auf. Die Aufteilung basiert auf den unterschiedlichen Aufgabenfeldern und gesetzlichen Regelungen. Die Air Transport Association (ATA) teilt diese Systeme in sogenannte Kapitel (Chapter) ein [43]. Tabelle 2.2 gibt einen Ausschnitt der Aufteilung der Teilsysteme in die ATA-Kapitel wieder, welche für die Anwendung in der Kabine besonders wichtig sind.

ATA-Kapitel	Kapitelname	Kabinensystem
21	Klimatisierung	Klimaanlage
23	Kommunikation	Lautsprecheranlage
23	Kommunikation	Gegensprechanlage
26	Brandschutz	Rauchmelder
33	Beleuchtung	Kabinenbeleuchtung
38	Wasser/Abwasser	Waschräume

Tabelle 2.2: Ausschnitt über die Aufteilung einzelner Kabinensysteme in ATA Kapitel [43]

In der Vergangenheit waren die Anwendungen der einzelnen Kapitel meist als eigenständiges System umgesetzt. Durch die Verfügbarkeit von leistungsfähigen Netzwerktechnologien, geht der Trend aktuell zu einer zunehmenden Integration mehrerer Kapitel in einem System. Diese Auslegung wird auch als Cross-ATA bezeichnet, da Teilsysteme aus mehreren ATA Kapiteln in einem System/Netzwerk zusammengefasst werden.

Durch den Zusammenschluss mehrere Teilsysteme in ein Netzwerk, kann potenziell die Wirtschaftlichkeit des gesamten Netzwerks erhöht werden. Diese Fusion

verschiedener Netzwerktypen in ein neues einheitliches Ethernetnetzwerk, kann beispielsweise den Personalbedarf bei Entwicklung und Wartung dieses Netzwerkes senken. Es werden nicht mehr für jedes Nischen-System eigene Experten benötigt.

Die zu wählende Technologie sollte somit unterschiedlichen Datenverkehr in einem Netzwerk implementieren können, um eine fortschreitenden Cross-ATA Auslegung unterstützen zu können.

2.4 Zusammenfassung

ID	Anforderung
1	Nachweis der Lufttüchtigkeit (bspw. nach DO-178C, DO-254)
2	Echtzeitfähigkeit mit definierter Latenz und definiertem Jitter
3	Unterstützung multipler Nachrichtenklassen mit unterschiedlichen Prioritäten
4	Beibehalten von vorhandenem Bauvolumen und Masse
5	Austauschbarkeit von Komponenten ohne Netzwerk-Neukonfiguration
6	Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen (bspw. nach DO-160G)

Tabelle 2.3: Anforderungsliste

In Tabelle 2.3 sind die aufgeführten Anforderungen in der Anforderungsliste zusammengefügt. Die - im Laufe der Arbeit - zu betrachtenden Technologien sind nur dann geeignet, wenn sowohl Software als auch ihre Hardware allen Anforderungen entsprechen.

3 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik, der zu betrachtenden Echtzeit-Ethernetprotokolle sowie der Stand von Zwei-Draht Ethernet (Single-Pair-Ethernet - SPE), vorgestellt. Des Weiteren werden die benötigten Grundlagen der Netzwerktechnik und Standard Ethernet aufgearbeitet. AFDX wird, als bereits umgesetztes Beispiel, vorgestellt. Auf diesem Grundwissen basiert der folgende Aufbau dieser Arbeit.

3.1 Einführung in Netzwerktechnik und Ethernet

In diesem Abschnitt soll erläutert werden, was genau unter Echtzeitfähigkeit und Determinismus zu verstehen ist. Außerdem werden grundlegende Begriffe der Netzwerktechnik erklärt.

3.1.1 Grundlagen der Netzwerktechnik

Als Netzwerk wird gemeinhin eine physikalische und/oder logische Verbindung mehrerer Komponenten oder Systeme bezeichnet.

Um die Leistungs- und Echtzeitfähigkeit eines Netzwerkes beurteilen zu können werden verschiedene Kennzahlen untersucht. Darunter auch Jitter und Latenz. Dabei ist unter Latenz, die Nachrichtenlaufzeit durch das Netzwerk zu verstehen. Also die Zeitdifferenz (d) zwischen dem Zeitpunkt des Abschickens der Nachricht am Sender (t_{Sende}) und dem Empfang der Nachricht beim Empfänger (t_{Empfang}). Darstellbar mit folgender Formel:

$$d = t_{\text{Empfang}} - t_{\text{Sende}} \quad (3.1)$$

Der Jitter beschreibt die Varianz der Nachrichtenlaufzeit, also die Differenz zwischen maximaler Nachrichtenlaufzeit (d_{\max}) und minimaler Nachrichtenlaufzeit (d_{\min}) und kann mit folgender Formel dargestellt werden:

$$d_{\text{Jitter}} = d_{\max} - d_{\min} \quad (3.2)$$

Ein Netzwerk mit deterministischem Zugriffsverfahren, wird durch die folgenden Eigenschaften definiert [28]:

- Wird eine Nachricht zum Zeitpunkt t_{Sende} gesendet, so kommt diese Nachricht bei allen Empfängern im Zeitintervall $(t_{\text{Sende}}+d_{\min}, t_{\text{Sende}}+d_{\max})$ an. Dabei sind d_{\min} und d_{\max} a priori bekannt.
- Die Reihenfolge in welcher die Nachrichten die Empfänger erreichen, ist die gleiche Reihenfolge in der die Nachrichten die Sender verlassen haben. Dies gilt für alle Empfänger.
- Sollten mehr als eine Nachricht zum gleichen Zeitpunkt t_{Sende} zur Übertragung bereit stehen, so muss von vornherein festgelegt sein, in welcher Reihenfolge die Nachrichten durch das Netzwerk laufen.

Somit unterliegt der Zugriff auf das Übertragungsmedium, in einem deterministischen Netzwerk, geregelter Konventionen. Jeder Teilnehmer (TN) kann zu bestimmten Zeitpunkten, und nur zu diesen Zeitpunkten, auf das Medium zugreifen. Somit werden Kollisionen, durch gleichzeitigen Zugriff mehrerer TN, verhindert [40]. Diese Netzwerke sind so ausgelegt, dass jede eintreffende Begebenheit vorzusehen und entsprechend konfiguriert ist [17]. Dies funktioniert allerdings nur in einem geschlossenem Netzwerk (closed-world system), in welchem die Anzahl der TN a priori bekannt ist. In einem offenen Netzwerk (open-world system), wie dem Internet, ist ein deterministisches Verhalten nicht zu erreichen [28].

Typischerweise ist d_{\max} auf einen Wert begrenzt, welcher die Funktionsfähigkeit des Systems definiert. Klassisches Beispiel aus der Automobilindustrie ist hier beispielsweise das Auslösen des Airbags bei einem Unfall, bevor die Relativbewegung der Insassen einsetzt.

Eine solche Sachlage wird auch als harte Echtzeitanforderung bezeichnet.

Bei einigen Anwendungsfällen wird hingegen auch von weichen Echtzeitanforderungen gesprochen. Harte und weiche Echtzeitanforderungen unterscheiden sich in der Art der Folgen (den Auswirkungen) bei einem Verstoß gegen diese Anforderungen.

Bei der Verletzung von harten Echtzeitanforderungen, kann es zu Gefährdung der

körperlichen Unversehrtheit kommen. Beispielsweise beim eben genannten Auto-unfall oder wenn dies die Flugsteuerung betrifft.

Bei der Verletzung von weichen Echtzeitanforderungen, kommt es hingegen nur zur Verminderung der Qualität. Beispielsweise bei einer Gesprächsübertragung mittels Voice over IP (VoIP).

In der Netzwerktechnik werden verschiedene Betriebsarten des Kommunikationsflusses unterschieden (siehe auch Abbildung 3.1, 3.2, 3.3). Von größter Bedeutung sind Simplex und Duplex.

Simplex ist die einfachste Variante. Hierbei ist eine Übertragung nur in eine Richtung möglich (dargestellt in Abbildung 3.1). Als Beispiel kann hier das klassische Radio herangezogen werden. Jeder Hörer, der den Kanal eingeschaltet hat, kann die Übertragung hören. Es kann multiple Empfänger, aber nur einen Sender, geben. Ein Rücksendekanal vom Hörer zum Sender existiert nicht [25].

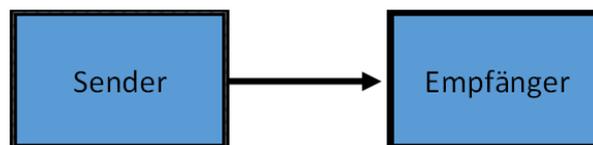


Abbildung 3.1: Prinzip der Datenübertragung im Simplex Betrieb

Unter Duplex ist eine Betriebsart zu verstehen, in der die Kommunikation in beide Richtungen möglich ist. Diese wird nochmals in Halbduplex und Vollduplex untergliedert.

Bei Halbduplex Betrieb kann immer nur ein TN zurzeit senden, alle anderen sind Empfänger (dargestellt in Abbildung 3.2). Beispiel hierfür ist Sprechfunk.

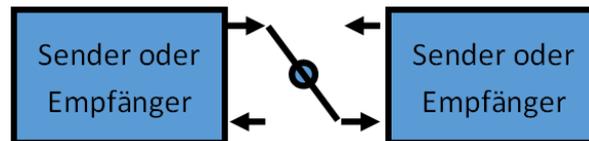


Abbildung 3.2: Prinzip der Datenübertragung im Halbduplex Betrieb

Im Vollduplex Betrieb ist es möglich, dass TN gleichzeitig senden und empfangen (dargestellt in Abbildung 3.3).

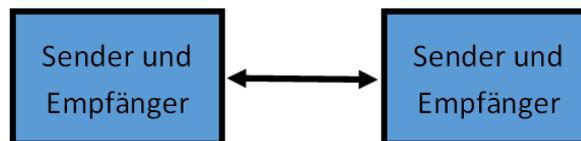


Abbildung 3.3: Prinzip der Datenübertragung im Vollduplex Betrieb

Die Übertragung von Daten innerhalb eines Netzwerkes, oder auch zwischen Netzwerken, unterliegt gewissen Konventionen. Eine der wichtigsten Konventionen stellt das Open Systems Interconnection (OSI) Referenzmodell dar, welches von der International Organization for Standardization (ISO) 1984 als Standard für die Schichtenarchitektur von Netzwerkprotokollen standardisiert wurde [39][40]. Das Schichtenmodell besteht aus sieben Schichten, welche in Tabelle 3.1 aufgeführt sind.

1	Physical Layer Bitübertragungsschicht
2	Data Link Layer Sicherheitsschicht
3	Network Layer Vermittlungsschicht
4	Transport Layer Transportschicht
5	Session Layer Sitzungsschicht
6	Presentation Layer Darstellungsschicht
7	Application Layer Anwendungsschicht

Tabelle 3.1: Schichtenmodell mit englischen und deutschen Bezeichnungen

In einigen Publikationen werden diese Schichten auch in umgedrehter Reihenfolge dargestellt.

Im Verlauf dieser Arbeit werden hauptsächlich die ersten beiden Schichten betrachtet. Schicht 1 unter der Betrachtung des physikalischen Übertragungsmediums, sowie Schicht 2 im Bezug auf verschiedene Ethernet Standards.

Der Physical Layer dient zur physikalischen Übertragung der Nachrichten. Hier sind

alle physikalischen Parameter festgelegt, wie beispielsweise Spannungen und Ströme bei Kupferleitungen [25]. Somit definiert diese Schicht auch das Übertragungsmedium [23].

Der Data Link Layer übernimmt die Aufgabe, einen fehlerfreien Datenaustausch zu gewährleisten [40]. Dazu entnimmt diese Schicht die Daten aus der darüberliegenden Schicht 3 und bringt sie in ein bestimmtes - Frame genanntes - Format, indem Prüfsumme und Header ergänzt werden. Die Prüfsumme wird auch Frame Check Sequence (FCS) genannt.

In dieser Arbeit soll die in Tabelle 3.2 visualisierte Umsetzung betrachtet werden. Dabei steht in Schicht 1 Single Pair Ethernet (SPE) im Fokus. Für Schicht 2 ist sowohl eine Umsetzung mittels Time-Triggered Ethernet als auch Time Sensitive Networking denkbar.

1	Single Pair Ethernet
2	Time-Triggered Ethernet Time Sensitive Networking
3	Network Layer Vermittlungsschicht
4	Transport Layer Transportschicht
5	Session Layer Sitzungsschicht
6	Presentation Layer Darstellungsschicht
7	Application Layer Anwendungsschicht

Tabelle 3.2: Angestrebte Umsetzung im Schichtenmodell visualisiert

3.1.2 Geschichte des Ethernet

Ethernet, wie es beispielsweise aus Heimnetzwerken bekannt ist, ist nach IEEE 802.3 standardisiert [10]. In den ersten Entwicklungsstufen konnte jeder TN zu jeder Zeit senden. Dadurch kam es bei steigender Netzwerkauslastung immer häufiger zu Kollisionen von Nachrichten. Diese Problematik wurde jedoch schnell erkannt und das sogenannte Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection (CSMA/CD) eingeführt. Hierbei können weiterhin mehrere TN gleichzeitig auf das Medium zugreifen (Multiple Access), jedoch prüft jeder sendewillige TN zuerst, ob das Medium frei ist (Carrier Sense) bevor mit der Sendung begonnen wird. Doch auch hier kann es zu Kollisionen von Nachrichten führen, sollten zwei TN gleichzeitig mit dem Senden beginnen. Da die TN auch während des Sendens weiterhin das Medium abhören, werden Kollisionen erkannt (Collision Detection) [25]. Beide TN stellen das Senden ein und warten eine zufällige Zeit, bis erneut mit dem Senden begonnen wird. Mit dieser Lösung funktioniert das Netzwerk relativ zuverlässig, es kann aber dennoch keine Garantie gegeben werden ob und wann eine gesendete Nachricht beim Empfänger ankommt. Eine solche Netzwerkkonfiguration ist somit nicht echtzeitfähig [40]. Um Echtzeitfähigkeit in einem Ethernet basierten Netzwerk erreichen zu können, bedarf es also Änderungen bzw. Erweiterungen des IEEE Standard 802.3. TTEthernet, TSN und AFDX bieten solche Erweiterungen.

3.2 AFDX™

3.2.1 Grundlagen

Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX) ist ein auf IEEE 802.3 Ethernet basierender Standard, welcher nach Aeronautical Radio Incorporated (ARINC)-664 Part 7 spezifiziert ist und ursprünglich von Airbus eingeführt wurde. Wie der Name bereits erahnen lässt, handelt es sich hierbei um eine Switched Ethernet Architektur in der die TN im Vollduplex Betrieb kommunizieren. AFDX kommt bereits in vielen Flugzeugen, darunter beispielsweise Airbus A380, A350, A400M sowie Boeing 787 zum Einsatz [12]. IEEE 802.3 Standard Ethernet ist per se nicht echtzeitfähig. Das CSMA/CD Verfahren reduziert sowohl Häufigkeit als auch Auswirkung von Nachrichtenkollisionen, kann diese aber nicht garantiert verhindern. Obwohl AFDX auf IEEE 802.3 Ethernet basiert, wurden deshalb für die Echtzeitfähigkeit multiple Änderungen an dessen Protokoll durchgeführt. Diese werden in diesem Kapitel kurz erläutert.

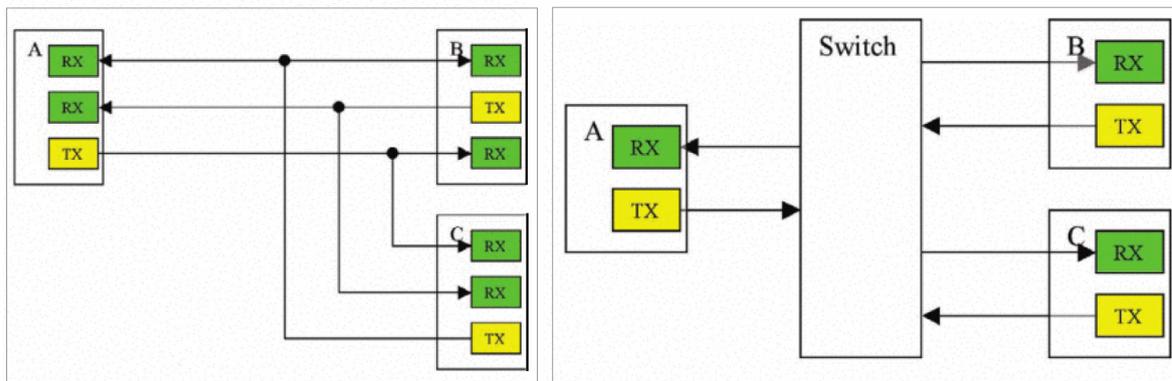


Abbildung 3.4: Netzwerkarchitektur von Direktverdrahtung unter ARINC-429 (links) und Switched Ethernet unter ARINC-664P7 (rechts) im Vergleich (Schemadarstellung)[37]

In Abbildung 3.4 ist zu erkennen, wo die Vorteile einer Switched Ethernet Architektur liegen. Unter ARINC-429 (linke Bildhälfte) muss der Transmitter Port (TX) eines sendenden TN einzeln mit dem Receiver Port (RX) eines jeden empfangenden TN verdrahtet werden. Unter ARINC-664P7 (rechte Bildhälfte) ist jeder TN nur mit dem Switch verbunden. Dieser übernimmt die Weiterleitung der Nachrichten an

die Empfänger. Dadurch kann der Verdrahtungsaufwand und somit sowohl Verlege- als auch Instandhaltungskosten reduziert werden. Dies kann auch zu einer Reduktion des Gesamtgewichtes führen, was allerdings maßgeblich von dem Gewicht und der Anzahl der verbauten Switches abhängt. Die Verbindung der TN untereinander wird nun Virtual Link (VL) genannt. Sie bilden den point-to-point Mechanismus aus ARINC-429 virtuell nach [38].

Die Fehlertoleranz kann erhöht werden, durch hardwareseitig redundante Auslegung der Switches und VL (siehe Abbildung 3.5). Hierbei wird die zu sendende Nachricht vom Endsystem gleichzeitig in zwei Netzwerke geschickt. In Abbildung 3.5 A Network und B Network genannt. Funktionieren beide Netzwerke, so kommen beim Empfänger zwei gleiche Nachrichten an. Das empfangende Endsystem ist in der Lage redundante Nachrichten zu erkennen. Dabei wird die erste eintreffende Nachricht behalten und die zweite Nachricht verworfen. Die Übermittlung der Daten ist also auch bei Ausfall eines der beiden Netzwerke noch garantiert.

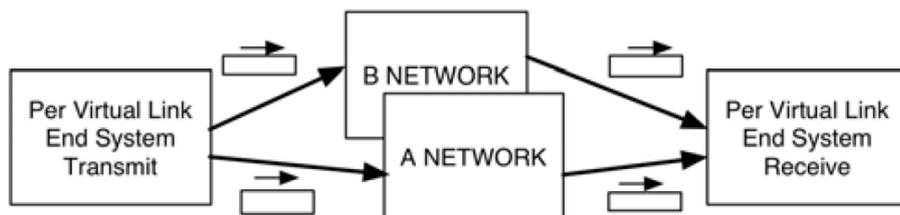


Abbildung 3.5: Redundante Hardwareauslegung mittels zweier Netzwerke [7]

AFDX bietet die Möglichkeit, dass sich mehrere VL ein physikalisches Medium teilen. Damit es hierbei nicht zu Kollisionen kommt, werden VL auf zwei Arten limitiert. Einmal durch die Bandwidth Allocation Gap (BAG) und weiter durch Limitierung der maximal erlaubten Framegröße. Die BAG beschreibt das kleinste Intervall in welchem Frames auf einem VL gesendet werden dürfen. Sie reicht von 1 ms bis 128ms (entsprechend Tabelle 3.3). Somit wird auch die maximale Frequenz von Übertragungen festgelegt, denn es gilt:

$$Hz = \frac{1}{s} \quad (3.3)$$

Des Weiteren wird die maximal zu versendende Paketgröße limitiert (L_{max}). Daraus lässt sich die maximal nutzbare Datenübertragungsrate (D_{max}) wie folgt ableiten [23]:

$$D_{max} = \frac{L_{max}}{BAG} \quad (3.4)$$

BAG milliseconds	Hz
1	1000
2	500
4	250
8	125
16	62.5
32	31.25
64	15.625
128	7.8125

Tabelle 3.3: Zulässige Werte der BAG und die dazugehörigen implizierten Frequenzen [7]

3.2.2 Nachrichtenklassen

AFDX besitzt zwei Nachrichtenklasse (Prioritäten).

- high-priority Daten
- low-priority Daten

In AFDX Switches ist ein Mechanismus implementiert, welcher die Weiterleitung auf Basis der Priorität regelt [30].

3.2.3 AFDX Frame

In Abbildung 3.6 ist der Aufbau eines AFDX-Frames dargestellt. Als eigentliche Payload (Nutzdaten) stehen hierbei maximal 1471 Byte zu Verfügung. Die minimale Payload Größe beträgt 17 Byte. Werden diese nicht erreicht wird das Pad Feld solange mit Nullen aufgefüllt bis Payload und Pad Feld zusammen 17 Byte ergeben (siehe orange markierte Felder in Abbildung 3.6). Dies garantiert, dass die nachfolgenden Informationen richtig interpretiert werden.

7 Byte	1 Byte	6 Byte	6 Byte	2 Byte	20 Byte	8 Byte	0-1471 Byte	0-17 Bytes	1 Byte	4 Byte	12 Byte
Preamble	Start Frame Delimiter	Destination Address	Source Address	Type	IP Structure	UDP Structure	Payload	Pad	Sequence Number	Frame Check Sequence	Interframe Gap

Abbildung 3.6: Aufbau eines Ethernet-Frame [7]

Im Gegensatz zu Standard Ethernet, welches eine Payload von 1742 Byte aufweist, fällt diese bei AFDX um ein Byte kleiner aus. Das ist der Einführung des Sequence Number Feldes geschuldet. Mit diesem Byte werden Nachrichten von 1 bis 255 nummeriert, um bei redundanter Netzwerkauslegung gleiche Nachrichten identifizieren zu können. Die Sequence Number 0 ist hierbei reserviert für den End System Reset Befehl und wird in der normalen Nummerierung der Nachrichten nicht genutzt.

Nach jedem AFDX Frame folgt eine 12 Byte lange Lücke, die sogenannte Interframe Gap (grau markiert in Abbildung 3.6).

3.3 Time Triggered Ethernet

In diesem Unterkapitel wird Time Triggered Ethernet vorgestellt. Zuerst werden in Abschnitt 3.3.1 die Grundlagen eingeführt, welche Time Triggered Ethernet zu Echtzeitfähigkeit und Determinismus verhelfen. Anschließend stellt Abschnitt 3.3.2 die unterstützten Nachrichtenklassen vor. Abschnitt 3.3.3 betrachtet abschließend den Time Triggered Ethernet Frame.

3.3.1 Grundlagen

TTEthernet wurde von der Real-Time Systems Group der Technischen Universität Wien entwickelt und von TTTech Computertechnik AG übernommen [44], sowie anschließend unter SAE AS 6802 standardisiert [11]. Es basiert auf Switched Ethernet nach IEEE Standard 802.3, weist aber darüber hinaus Merkmale auf, welche Echtzeitfähigkeit garantieren. TTEthernet wurde entwickelt um eine große Bandbreite an Applikationen zu unterstützen. Von einfachen Datenerhebungsanwendungen über Multimediaanwendungen bis hin zu höchstanspruchsvollen sicherheitsrelevanten Echtzeit-Anwendungen, welche auf eine erhöhte Fehlertoleranz angewiesen sind, bietet TTEthernet die passende Plattform [28]. Dabei unterscheidet TTEthernet grundlegend zwischen zwei Kategorien des Datenverkehrs: Event-Triggered Datenverkehr, wie er auch im Standard Ethernet vorkommt, sowie Time-Triggered Datenverkehr mit garantierter Übertragung und zeitlich genau definierten Signallaufzeiten.

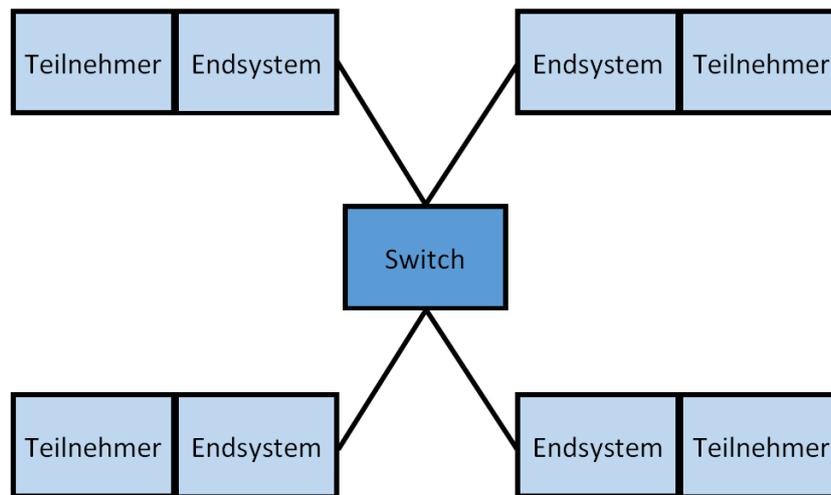


Abbildung 3.7: Switched TTEthernet Architektur

Das Prinzip einer Time-Triggered Switched Ethernet Architektur ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Dabei ist jeder TN mittels Controller eines Endsystems mit einem Switch verbunden. Schickt ein TN eine Nachricht los, ist es die Aufgabe des Switches diese an den/die richtigen Empfänger weiterzuleiten. In den Abbildungen 3.8 und 3.9 ist zu erkennen, dass durch doppelte (redundante) Auslegung der Switches die Fehlertoleranz des Netzwerks erhöht werden kann. Fällt in dieser Konstellation ein Switch aus, so kann weiterhin der gesamte Datenverkehr ohne Einschränkungen über den jeweils anderen Switch abgewickelt werden (siehe Abbildung 3.9).

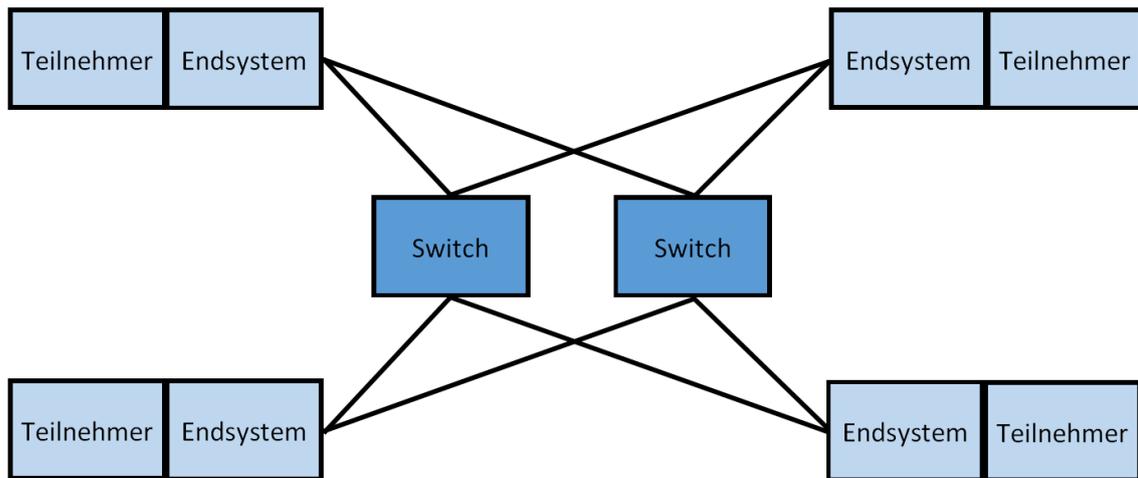


Abbildung 3.8: Sicherheitskritische TTEthernet Architektur in redundanter Auslegung der Switches und VL

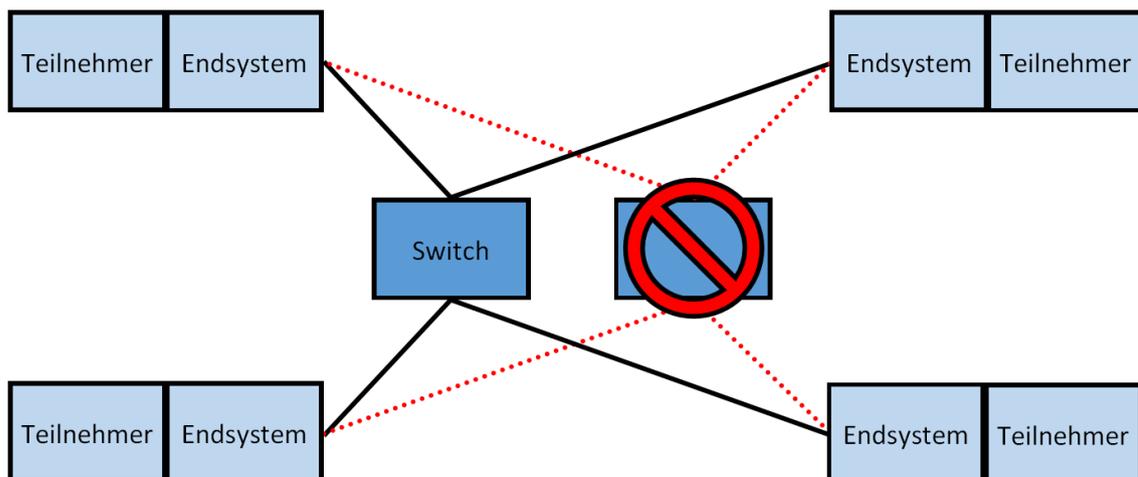


Abbildung 3.9: Trotz Ausfall eines Switches ist das Netzwerk hier weiterhin funktionsfähig

TTEthernet ist ein synchrones und zyklisches Verfahren. Synchroner Datenübertragung bedeutet, dass zu übertragende Daten in einem festgelegten Rahmen in OSI Schicht 2 zusammengefasst werden [26]. Zyklisch bezieht sich auf den festgelegten Schedule, welcher TN nach festgelegten Regeln in jeder Zykluszeit abfragt.

Damit dieses Verfahren funktionieren kann, müssen alle TN sich auf eine gemeinsame globale Zeit festlegen. Dazu besitzen alle TN dieses Netzwerks lokale Uhren, welche regelmäßig untereinander synchronisiert werden. Für diese Synchronisation werden den TN Rollen zugewiesen. Dabei kann es mehrere Synchronisation Master und Synchronisation Clients geben, aber nur einem TN wird die Rolle des Compression Master zugewiesen. Die TN partizipieren, in ihren Rollen, in einem zweistufigem Synchronisationsprotokoll (siehe Abbildungen 3.10 und 3.11).

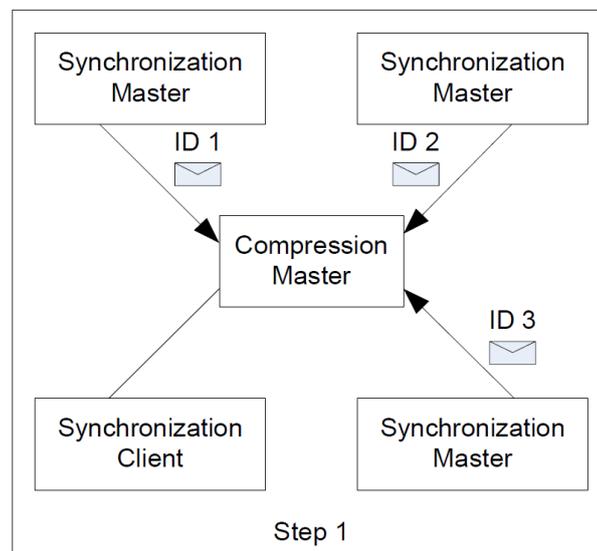


Abbildung 3.10: Aussendung der Integration Frames von Synchronisation Master zu Compression Master [47]

Im ersten Schritt (Abbildung 3.10) sendet jeder Synchronisation Master, zu einem festgesetzten Zeitpunkt, einen Integration Frame an den Compression Master, dieser beinhaltet die lokale Uhrzeit des TN.

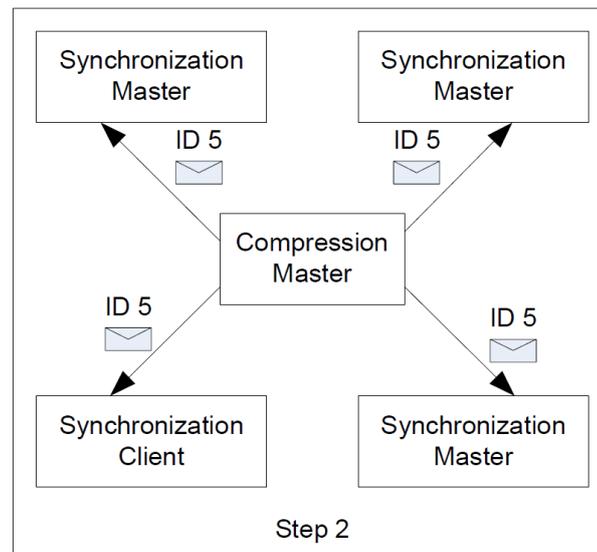


Abbildung 3.11: Aussendung der neuen globalen Uhrzeit von Compression Master zu allen Synchronisation Master und Synchronisation Clients [47]

Im zweiten Schritt (Abbildung 3.11) berechnet der Compression Master, auf Basis der erhaltenen lokalen Uhrzeiten der Integration Frames, einen Mittelwert, die neue globale Zeit für alle TN im Netzwerk. Dieser Mittelwert wird nun wiederum an alle Synchronisation Master und Synchronisation Clients gesendet.

Wird diese Synchronisation in definierten zeitlichen Abständen durchgeführt, so kann trotz Drifts der lokalen Uhren eine ausreichende Genauigkeit garantiert werden (siehe Abbildung 3.12). Hierbei wird eine Genauigkeit der Zeit als Precision Interval definiert, in welchem mittig der Mittelwert aller Uhrzeiten liegt. Befinden sich alle lokalen Uhrzeiten innerhalb dieses Intervalls, kann ein Einhalten des Schedules garantiert werden. Würden die angeschlossenen TN nicht in vorgegebenen Intervallen synchronisieren, würden die lokalen Uhrzeiten (visualisiert durch die unterschiedlich gestrichelten Linien) immer weiter voneinander abdriften und ein Einhalten des Schedules könnte nicht mehr garantiert werden.

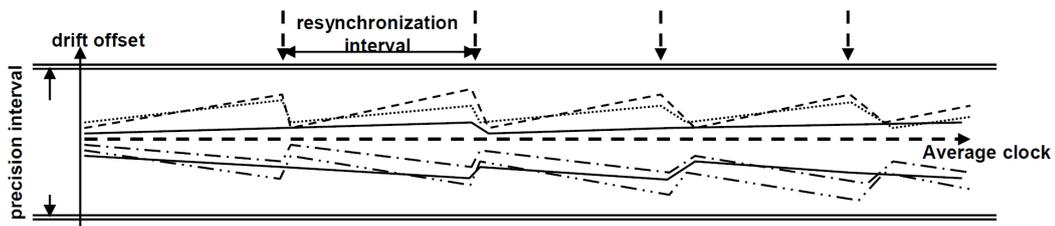


Abbildung 3.12: Darstellung des Drifts der lokalen Uhren und der Synchronisation [36]

3.3.2 Nachrichtenklassen

Innerhalb von TTEthernet werden drei Nachrichtenklassen unterschieden [29]:

- Time-Triggered (TT) nach SAE AS6802
- Rate-Constrained (RC) nach ARINC 664 Part 7
- Best-Effort (BE) nach IEEE 802.3

Time-Triggered (TT) Nachrichten haben die höchste Priorität. Diese Nachrichtenklasse ist die einzige zeitgesteuerte (time-triggered) Klasse. Jedem TN werden in einem offline konfigurierten Zeitplan (Schedule) feste Zeitfenster zugewiesen, sogenannte Slots, wann dieser schreibend auf das Medium zugreifen darf. Ein solches Verfahren wird auch koordiniertes Time-Division-Multiple-Access (TDMA) genannt. Es gewährleistet ein deterministisches Verhalten mit vorhersagbaren Latenzen. Bei diesem Verfahren ruht die gesamte Zuverlässigkeit auf dem Schedule. Dieser muss sicherstellen, dass es zu keinen Kollisionen kommen kann. Nur TT Nachrichten basieren auf diesem Schedule. Alle anderen Nachrichtenklassen werden übermittelt sobald genügend Bandbreite zur Verfügung steht [15].

Rate-Constrained (RC) Nachrichten sind ereignisgesteuert (event-triggered). Sie haben eine geringere Priorität als TT Nachrichten, aber eine höhere Priorität als BE Nachrichten. Auch diese Nachrichtenklasse ist echtzeitfähig und basiert auf AFDXTM und somit dem ARINC-664 Protokoll.

Best-Effort (BE) Nachrichten haben die geringste Priorität und sind, genau wie RC, ereignisgesteuert. BE Nachrichten werden im Switch nur weitergeleitet, solange keine Nachrichten mit höherer Priorität bearbeitet werden. Viele Switches haben die Fähigkeit diese BE Nachrichten in eine Warteschlange zu verschieben, bis die Nachrichten höherer Priorität weitergeleitet wurden. Ein solcher Switch wird

als store-and-forward Switch bezeichnet. Sind aber zu viele BE Nachrichten für die Größe der Warteschlange vorhanden, werden einige Nachrichten verworfen. Daher kann eine Weiterleitung der Nachrichten dieser Nachrichtenklasse nicht garantiert werden. Vergleich Abbildung 3.13, hier werden nicht alle BE Nachrichten vom Switch weitergeleitet. BE Nachrichten basieren auf Standard Ethernet nach IEEE 802.3

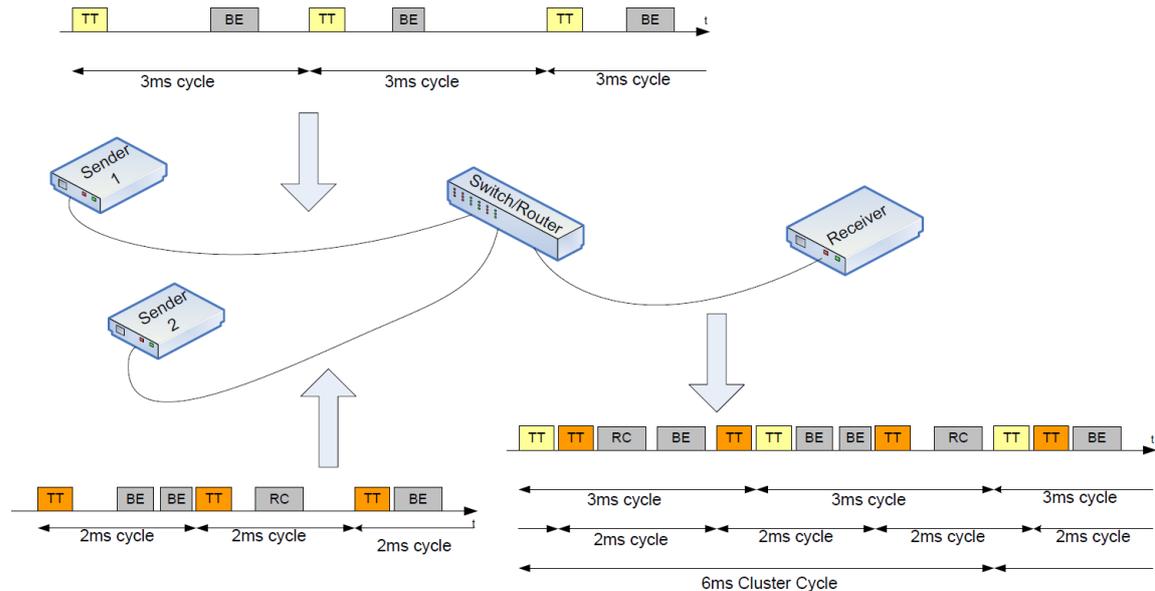


Abbildung 3.13: Beispieldarstellung eines TTEthernet Datenfluss der drei Nachrichtenklassen [46]

3.3.3 TTEthernet Frame

TTEthernet basiert auf dem Standard Ethernet Frame, welcher nicht in der Lage ist die Priorität einer Nachricht darzustellen. Wie aber bereits erläutert, unterstützt TTEthernet drei Nachrichtenklassen mit unterschiedlichen Prioritäten. Um diese abbilden zu können, wird das Feld der Zieladresse unter TTEthernet anders interpretiert. Die ehemals 6 Byte umfassende Zieladresse wird nun aufgeteilt in einen 4 Byte großen Critical Traffic Marker (CT-Marker) und eine 2 Byte große Critical Traffic ID (CT-ID) [44] (siehe Abbildung 3.14). Dabei markiert der CT-Marker die Nachricht als zeitkritische Nachricht. Die CT-ID identifiziert die Nachricht selbst und gibt an, um welche Art zeitkritischer Nachricht es sich handelt. Wird die Nachricht als TT ausgewiesen, so wird der Switch diese Nachricht gemäß des TT-Schedule weiterleiten [15]. Wird diese Nachricht hingegen als RC ausgewiesen, so muss sich der Switch nicht nach dem TT-Schedule richten, sondern kann die Nachricht nach den Regeln des ARINC-664 Protokoll weiterleiten. Darüber hinaus werden zeitkritische Nachrichten im Type Feld gesondert ausgewiesen. Nach IEEE 802.3 ist ein spezielles Bitmuster, 0x88D7, für zeitkritische Nachrichten reserviert [10].

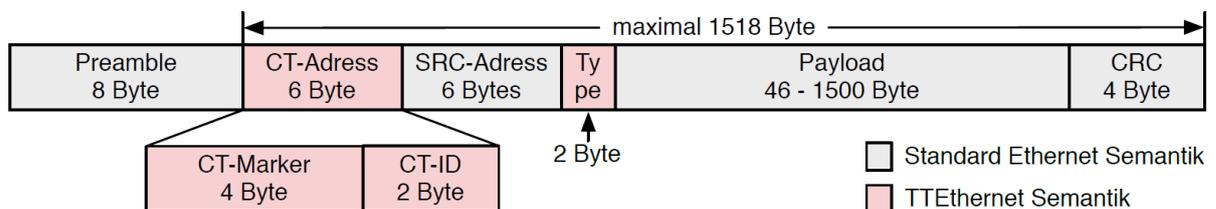


Abbildung 3.14: Aufbau eines TTEthernet Frames und dessen Unterschiede zum Standard Ethernet Frame [44]

3.4 Time Sensitive Networking

Folgend wird Time Sensitive Networking (TSN) vorgestellt.

Abschnitt 3.4.1 führt in die Thematik ein. Die Abschnitte 3.4.2 und 3.4.3 stellen die Eigenschaften von TSN vor, mit denen Determinismus gewährleistet wird. Abschnitt 3.4.4 erläutert abschließend die unterstützten Nachrichtenklassen.

3.4.1 Grundlagen

Unter TSN ist eine Reihe Standards zu verstehen, welche unter IEEE 802.1, von der Time-Sensitive Networking Task Group, standardisiert sind (siehe auch Tabelle 3.4). Sinn dieser Standards ist es, deterministischen Datenverkehr, mit garantiertem Datentransport und begrenzter Latenz, basierend auf IEEE 802 Ethernetnetzwerken zu ermöglichen [14]. Diese Task Group und der gesamte Standard, basieren auf der Umbenennung der Audio Video Bridging (AVB) Task Group, welche sich speziell mit synchronisiertem Streaming von Bild- und Tonmaterial mittels Ethernetnetzwerken beschäftigt hat [13].

Wie auch TTEthernet ist TSN eine Methode, per se nichtechtzeitfähiges Ethernet für zeitkritischen Datenverkehr, mit weichen und harten Echtzeitanforderungen, zu öffnen. Somit reduziert TSN, durch Konvergenz von unterschiedlichem Datenverkehr in einem Netzwerk, die Komplexität des Gesamtnetzwerkes, welche bisher benötigt wurde um eine solche Charakteristik zu erreichen. Dabei schützt TSN den zeitkritischen Datenverkehr vor dem konvergente nicht-zeitkritischen Datenverkehr [42].

Für die korrekte Funktion des Netzwerkes ist es essentiell, dass alle TN das gleiche Verständnis der Zeit haben [16]. Daher sind alle TN, entweder durch das Precision Time Protocol nach IEEE 1588 oder das darauf basierende neue IEEE 802.1AS-Rev, auf eine globale Zeit synchronisiert [2] [20]. Dieses basiert auf einem Master-Slave-Verfahren, wobei ein TN als Grand Master agiert und die Grand Master Clock besitzt. Auf diese Uhrzeit synchronisieren sich alle anderen TN [41].

Standard	Title
IEEE 802.1AS-Rev	Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications
IEEE 802.1Qav	Forwarding and Queuing Enhancements for Time-Sensitive Streams
IEEE 802.1Qbv	Enhancements for Scheduled Traffic
802.1Qbu & IEEE 802.3br	Frame preemption
IEEE 802.1Qca	Path Control and Reservation
IEEE 802.1Qcc	Stream Reservation Protocol (SRP) Enhancements and Performance Improvements
IEEE 802.1Qci	Per-Stream Filtering and Policing
IEEE 802.1CB	Frame Replication & Elimination for Reliability

Tabelle 3.4: Ausschnitt der wichtigsten TSN Standards [50]

3.4.2 Credit Based Shaping und Time Aware Shaping

TSN Netzwerke werden als konvergente Netzwerke (converged networks) bezeichnet, da sie Datenverkehr mit unterschiedlichen Zeitanforderungen innerhalb eines Netzwerkes beinhalten. Daher ist es essentiell, zeitkritischen und nicht-zeitkritischen Datenverkehr im selben Netzwerk unterscheiden zu können.

Mit IEEE 802.1Qav wird Credit Based Shaping (CBS) [27] und mit IEEE 802.1Qbv Time Aware Shaping (TAS) eingeführt [31], um Best-Effort Datenverkehr und zeitkritischen Datenverkehr zu unterscheiden und letzteren zu priorisieren.

Credit Based Shaping (CBS) beschreibt einen Teilstandard, welcher den Echtzeit-Datenverkehr formt, sodass dieser Datenverkehr nicht die gesamte bereitgestellte Bandbreite ausnutzt. Wenn viele TN gleichzeitig Echtzeit-Daten übermittelt wollen, kann es zu Bursts (viele Frames in kürzester Zeit) kommen. Nutzen diese Daten das Medium voll aus, so kann in dieser Situation auch keinerlei BE-Datenverkehr übermittelt werden. Um die entsprechende Aufteilung der Nachrichten auf einen längeren Zeitraum kümmert sich CBS [21].

Dazu wird ein sogenannter Token Bucket Algorithmus verwendet. In einen virtuellen Behälter (Bucket) werden im Leerlauf konstant Token eingefüllt (visualisiert durch den idleSlope in Abbildung 3.15). Mit diesem Token Credit kann CBS Daten senden, wobei das Senden Token verbraucht (visualisiert durch den sendSlope in Abbildung 3.15). Die Anzahl der Token kann dabei auch negativ werden. Echtzeitdaten

können nur gesendet werden, wenn die Anzahl an Token im Behälter größer oder gleich Null ist. Die zu übermittelnden Daten warten in mehreren Warteschlangen (Queues), aufgeteilt nach ihren Prioritäten. Um den Fluss des BE Datenverkehrs nicht zum versiegen zu bringen, können BE Nachrichten auch gesendet werden, wenn der Credit negativ ist und keine Übertragung von Echtzeitdaten stattfindet [42]. Das Versenden von diesen BE Daten kostet keinen Credit und beeinträchtigt somit weder idleSlope noch sendSlope.

Darüber hinaus kann bei hohem Datenaufkommen auf einen Round-Robin Algorithmus umgeschwenkt werden, um Echtzeit-Datenverkehr mit niedrigeren Prioritäten das Übermitteln zu ermöglichen [42].

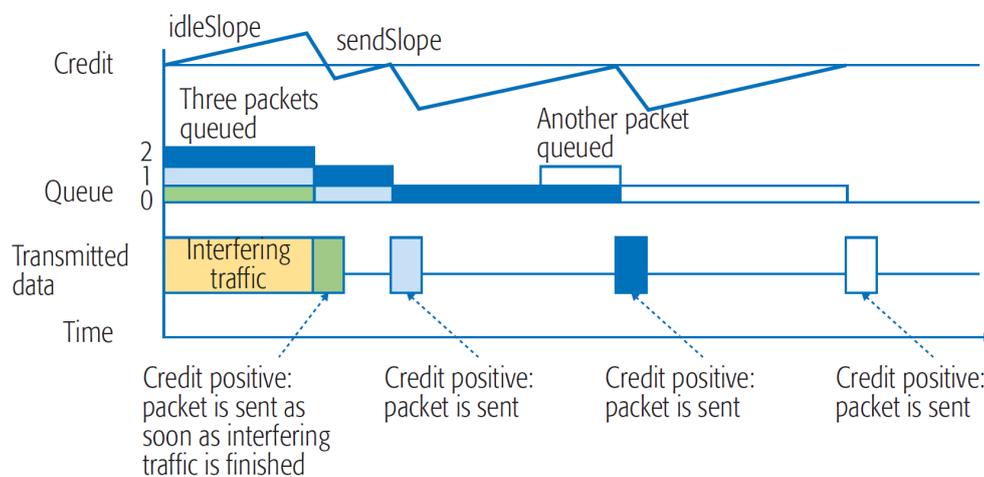


Abbildung 3.15: Visualisierung der Streckung von multiplen Frames auf einen längeren Zeitraum durch den Credit Based Shaper [34]

TAS führt einen Mechanismus ein, welcher als Tor (Gate) vorstellbar ist. Es werden Warteschlangen (Queues) gebildet, in welche der Datenverkehr nach seinen Prioritäten aufgeteilt wird. Bildlich gesprochen wird am Ausgang einer jeden Warteschlange ein virtueller Riegel vorgelegt. Dieser Riegel lässt nur in geöffnetem Zustand Datenverkehr aus der entsprechenden Warteschlange durch und verhindert in geschlossenem Zustand den Datenfluss [18] (siehe auch Abbildung 3.16). Das Verhalten dieses Mechanismus ist vorher zu programmieren. Ist die programmierte Reihenfolge einmal durchlaufen spricht man von einem Zyklus. Ab diesem Punkt wiederholt sich der Durchlauf nach einem jeden Zyklus automatisch [42]. Durch die Verbindung von vorprogrammiertem Schedule und Synchronisation aller TN auf eine globale Zeit, wird der Datenfluss erheblich optimiert. Des weiteren ist durch eine gleichbleibende Reihenfolge der Nachrichtenübermittlung in jedem

Zyklus vorhersehbar, wann die Nachrichten der einzelnen Klassen übermittelt werden.

TAS und weitere Mechanismen helfen die knappste Ressource, nämlich die zu Verfügung stehende Bandbreite, optimal zu nutzen.

Somit wird, genau wie bei TTEthernet, ein fester Zeitplan (Schedule) erstellt, welcher es erlaubt verschiedenen Datenverkehr auf einem Medium zu synchronisieren und feste Übertragungszeiten zu garantieren.

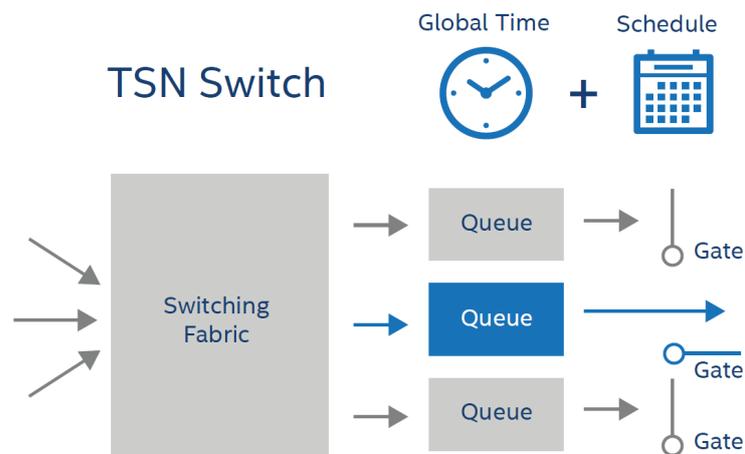


Abbildung 3.16: Visualisierung der Datenweiterleitung eines TSN-Switches nach den Prinzipien IEEE 802.1AS und IEEE 802.1Qbv [16].

3.4.3 Redundanz und Preemption

Mittels IEEE 802.1CB kann eine Redundanz im Datenfluss erzeugt werden. Dabei wird eine Kopie des Datenframes erstellt und auf einem anderen Weg ans Ziel geleitet. Die Nachricht, die zuerst das Ziel erreicht wird verarbeitet. Die andere Nachricht wird verworfen.

Um die verfügbare Bandbreite optimal auszunutzen, sind TSN Netzwerke in der Lage nicht-zeitkritischen Datenverkehr auch in Stücken zu übertragen. In anderen konvergenten Netzwerken kann es passieren, dass nicht-zeitkritischer Datenverkehr mit der Übertragung beginnt, kurz bevor zeitkritischer Datenverkehr mit der Übertragung starten soll. Dies kann theoretisch zwei Folgen haben:

Nicht-zeitkritischer Datenverkehr wird während der Übertragung unterbrochen und verworfen, sobald zeitkritische Daten übertragen werden sollen. Sobald die Übertragung des zeitkritischen Datenverkehrs abgeschlossen ist, muss der BE-Datenverkehr von vorne beginnen.

Oder der nicht-zeitkritische Datenverkehr fährt mit seiner Übertragung fort und besetzt so die Übertragungsressourcen, wobei die Übertragung von zeitkritischem Datenverkehr verzögert oder verhindert wird.

Um den Start von BE-Datenverkehr direkt vor zeitkritischem Datenverkehr zu verhindern, kann beispielsweise ein Guardband eingeführt werden. Dieses hat genau die Länge der längstmöglichen BE Nachricht und wird automatisch vor jede zeitkritische Nachricht gesetzt. Dadurch verringert sich die nutzbare Bandbreite jedoch drastisch. Um dies zu verhindern wird in IEEE 802.1Qbu eine Stückelung der BE Nachrichten in 64 Byte Stücke eingeführt (siehe Abbildung 3.17). Somit kann die Übertragung von BE Nachrichten alle 64 Byte unterbrochen werden [42]. Die bereits gesendeten Informationen werden nicht verworfen. Nach der Übertragung der zeitkritischen Daten, wird mit der Übertragung des BE-Verkehrs an der Stelle der Unterbrechung fortgefahren. Die folgenden Switches und Endsysteme sind in der Lage, die unterbrochene Nachricht wieder zusammenzusetzen [16].

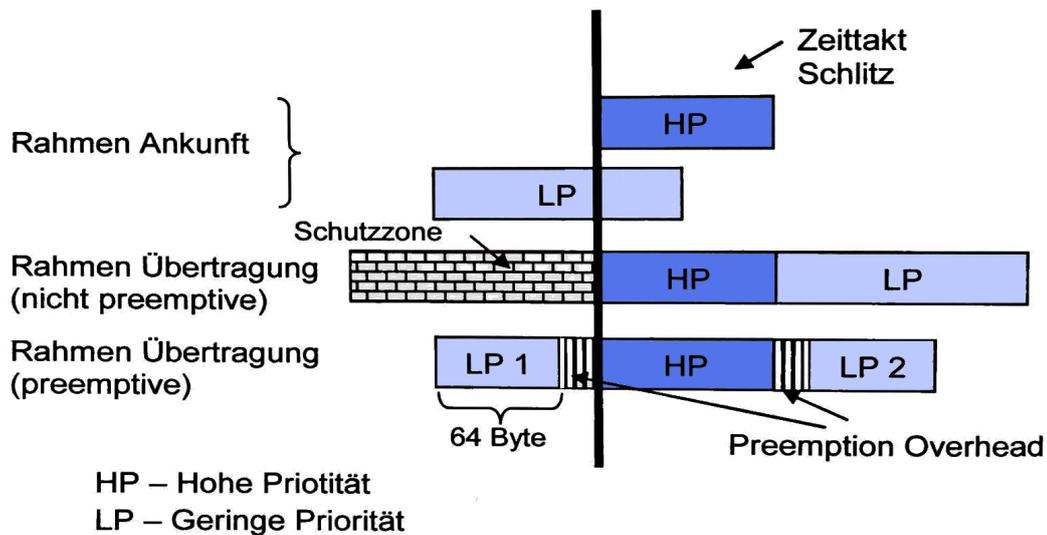


Abbildung 3.17: Visualisierung des Konfliktes von BE Datenverkehr (geringe Priorität - LP) und zeitkritischem Datenverkehr (hohe Priorität - HP). Von oben nach unten: Ungelöster Konflikt, Einsatz eines Guard Bands (Schutzzone), Preemption mit möglicher Unterbrechung nach 64 Byte [42]

3.4.4 Nachrichtenklassen

Insgesamt stehen unter TSN 4 Typen von Prioritätsklassen bzw. Nachrichtenklassen zu Verfügung (siehe auch Abbildung 3.18):

- Control Data Traffic
- AVB Class A
- AVB Class B
- Best Effort

Der TAS nach IEEE 802.1Qbv führt die Klasse Control Data Traffic (CDT) ein, welche die höchste Priorität besitzt [31]. Diese Klasse ist das eigentliche Novum gegenüber AVB innerhalb von TSN. Manchmal wird hierbei auch von Time-Triggered Nachrichten geredet.

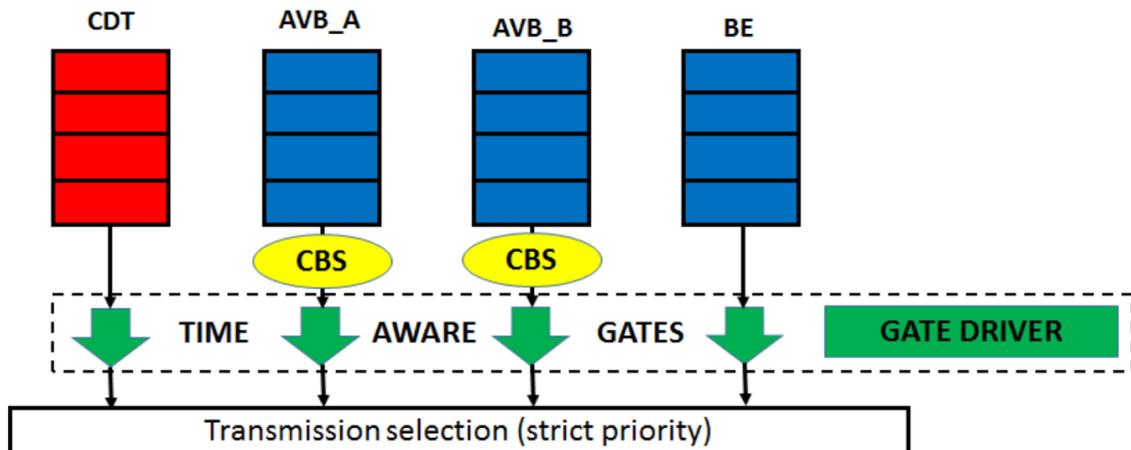


Abbildung 3.18: Darstellung der Aufteilung der einzelnen Nachrichten nach Prioritätsklasse im TAS (links höchste Priorität, rechts niedrigste Priorität) [33]

AVB spezifizierte bereits zwei Echtzeit-Nachrichtenklassen, basierend auf den Latenz-Anforderungen der Nachrichten. Diese werden Class A und Class B genannt. Bei Nachrichten der Class A, wird bei einer Übertragung über 7 Hops eine maximale Latenz von nur 2ms erwartet. Dahingegen wird bei gleichem Übertragungsweg und der Nutzung von Class-B eine maximale Latenz von 50ms erwartet [45]. Diese beiden Klassen können also zur Übertragung von Daten mit unterschiedlichen Echtzeitanforderungen genutzt werden.

Darüber hinaus können Nachrichten ohne Echtzeitanpruch als BE-Nachrichten - manchmal auf Legacy Traffic genannt - versendet werden.

3.5 Zwei-Draht Ethernet

3.5.1 Grundlagen

Zwei-Draht Ethernet - auch Single-Pair Ethernet (SPE) genannt - beschreibt ein Ethernet Netzwerk, welches als physikalisches Übertragungsmedium lediglich eine Leitung mit einem verdrehten Adernpaar (Twisted Pair genannt) verwendet [48]. Zum Vergleich wird in Büro- oder Wohnhausanwendungen, meist ein RJ-45 Stecker mit acht angeschlossenen Adern verwendet. Durch die Reduktion auf nur ein Adernpaar entsteht ein immenses Einsparungspotential, in Bezug auf Material und somit Gewicht. Mit einer Reduktion der Adern, wird auch der Leitungsquerschnitt des Gesamtkabels und somit der minimale Biegeradius verkleinert [32]. Diese Kriterien lassen SPE, wie gemacht für die Anwendung in der Flugzeugkabine, erscheinen. Was diese Art der Netzwerkausführung weiterhin auszeichnet, wird folgend erläutert.

3.5.2 Standards der IP-basierten Kommunikation mit SPE

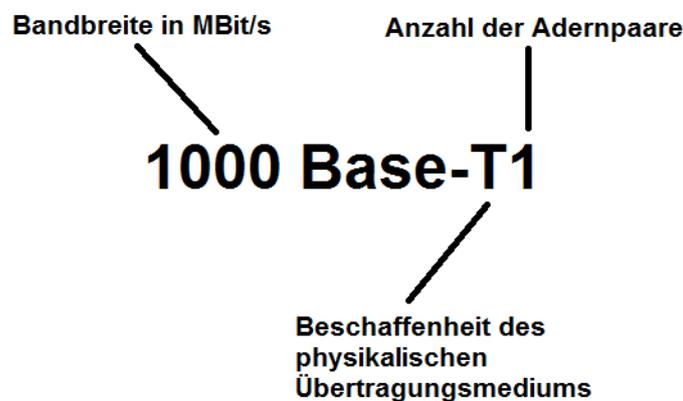


Abbildung 3.19: Erläuterung der Abkürzungen der Standards am Beispiel von 1000Base-T1

Innerhalb der IEEE 802.3 wurden unter anderem bereits 100 Base-T1 (IEEE 802.3bp) und 1000 Base-T1 (IEEE 802.3bw) standardisiert [32]. Wie in Abbildung 3.19 dargestellt, steht dabei die anführende Zahl für die maximale Bandbreite in MBit/s [40]. Der Buchstabe nach Base beschreibt die Beschaffenheit des physikalischen Übertragungsmediums. Hierbei steht T für verdrehte Kupferleitungen

(Twisted Pair). Die angehängte Zahl beziffert die Anzahl der Adernpaare, bei SPE logischerweise nur eines.

Somit existiert bereits ein Standard, welcher es ermöglicht 1000 MBit/s (bzw. 1GBit/s) über eine zweiadrige Leitung zu versenden. Ein 1000 Base-T1 Netzwerk arbeitet im Vollduplex. Nachrichten werden zeitgleich in beide Richtungen gesendet. Die empfangende Station blendet das eigene Signal aus, um das Empfangssignal zu isolieren. Diese Vorgehensweise wird Echokompensation genannt. Des weiteren bietet ein solches Netzwerk Power over Data Line (PoDL) bzw. Power over Ethernet (PoE) an. Damit können empfängerseitig Verbraucher mit bis zu 50 Watt gespeist werden.

Mittels Multi-Gig Automotive Ethernet (MultiGigBase-T1) kann sogar eine Bandbreite von bis zu 10 GBit/s realisiert werden. Hierbei schrumpft die maximale Leitungslänge jedoch auf nur noch 15 Meter zusammen. Bei der Verwendung von 1000Base-T1 und geschirmten Leitungen liegt die maximal überbrückbare Distanz bei immerhin 40 Metern. Ein genauerer Vergleich des Zusammenhangs von Bandbreite und Leitungslänge wird im folgenden Kapitel 4 - Vergleich und Bewertung - erläutert.

3.5.3 Normung der Steckgesichter und Steckervarianten

Unter International Electrotechnical Commission (IEC) 63171 wurden nun auch die Steckverbinder für SPE genormt [49]. Dabei beschreiben IEC 63171-1 bis IEC 63171-4, die Steckgesichter und Steckervarianten für Büro- bzw. Gebäudeumgebungen mit einer IP20-Schutzanforderung.

In Abbildung 3.20 sind die nach IEC 63171-5 genormten Steckgesichter der Firmen Phoenix Contact und Weidmüller abgebildet. Abbildung 3.21 zeigt die nach IEC 63171-6 genormten Steckgesichter der Firmen Harting, TE Connectivity und Hirose Electric [52]. Beide Steckertypen sind jeweils für den Einsatz in der Industrieautomation entwickelt und getestet worden. Die Stecker bieten Schutzklasse IP65 bzw. IP67.



Abbildung 3.20: Steckgesichter und Steckervarianten nach IEC 63171-5, wie von Firma Weidmüller vorgestellt und vertrieben [49]



Abbildung 3.21: Steckgesichter und Steckervarianten nach IEC 63171-6, wie von Firma Harting vorgestellt und vertrieben [49]

3.5.4 Switch Hardware

Da die Normung der Anschlussstandards zum Teil erst in Q4/2019 und Q1/2020 vollzogen wurde, beginnt die Industrie erst mit der Entwicklung und Vermarktung der entsprechenden Hardware.

Einige Firmen, darunter EKF Elektronik GmbH, haben allerdings bereits neue Produktlinien angekündigt. Unter dem Namen Embedded-Blue wird EKF verschiedene SPE-Switches vermarkten. In der dazugehörigen A-Series stehen, mit den SPE-Switches AL5 und AL6, zwei Ethernet-Switches in den Startlöchern, welche die neu genormten Steckgesichter nach IEC 63171-5 und IEC 63171-6 unterstützen [49] (siehe dazu Abbildung 3.22). Derzeit entwickelt EKF ebenfalls eigenständige Netzwerk-Switches, welche AVB/TSN Funktionalität bieten und auf 100Base-T1 basieren. Hierbei wird hardwareseitig auf Marvell T1 Switches mit einer ARMada CPU gesetzt, welche Echtzeitfähigkeit erlauben. Die Anschlüsse werden als Harting T1 nach IEC 63171-6 ausgeführt. Die Funktionalität wird nach Anforderungen von Automobil und Luftfahrt (Avionik) Anwendung ausgelegt [35].



Abbildung 3.22: Neu angekündigte SPE-Switches der Firma EKF für das Jahr 2020, mit Augenmerk auf AL5 (zweiter von links) und AL6 (zweiter von rechts) [49]

4 Vergleich und Bewertung

In diesem Kapitel werden die bisher vorgestellten Technologien im Bezug auf den geplanten Einsatzzweck sowie bezogen auf die gestellten Anforderungen bewertet.

4.1 Abgleich gegen die Anforderungen

Folgend werden die Technologien des Data Link Layer (Schicht 2), Time Triggered Ethernet und Time Sensitive Networking, betrachtet.

Um evaluieren zu können welche Technologie die geeignete ist, werden in diesem Abschnitt die gebotenen Features gegen die zu Anfang der Arbeit gestellten Anforderungen abgeglichen. Dazu seien die gestellten Anforderungen hier nochmals tabellarisch aufgeführt:

ID	Anforderung
1	Nachweis der Lufttüchtigkeit (CS25/FAR25)
2	Echtzeitfähigkeit mit definierter Latenz und definiertem Jitter
3	Unterstützung multipler Nachrichtenklassen mit unterschiedlichen Prioritäten
4	Beibehalten von vorhandenem Bauvolumen und Masse
5	Austauschbarkeit von Komponenten ohne Netzwerk-Neukonfiguration
6	Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen (bspw. nach DO-160G)

Tabelle 4.1: Anforderungsliste

Im folgenden wird auf die Anforderungen mit der vergebenen ID referenziert (siehe Tabelle 4.1).

4.1.1 Time Triggered Ethernet

Anforderung 1 - Nachweis der Lufttüchtigkeit: Für die Anwendung von TTEthernet werden bereits Hardware Komponenten wie Switches und Endsysteme vermarktet, welche nachweislich nach DO-178 bzw. DO-254 entwickelt wurden. Sind diese für kritische Anwendungen im Sinne der DAL Level gedacht, so wird hier ebenfalls die geforderte Ausfallsicherheit eingehalten.

Als entsprechenden Ethernet Switch bietet zum Beispiel die Firma TTTech das TTE Switch Module A664 Pro an. Dieser Ethernet Switch ist nach RTCA DO-254 DAL A, RTCA DO-178C DAL A und SAE ARP 4754/4761 zertifiziert.

Anforderung 2 - Echtzeitfähigkeit mit definierter Latenz und definiertem Jitter: Wie im Kapitel Stand der Technik beschrieben, setzt TTEthernet auf eine Zeitsynchronisation und einen vorkonfigurierten Schedule. Durch Verwendung dieses Schedules, kann sowohl Latenz als auch auf Jitter im Vorfeld bestimmt werden. Für diese Werte und die Übertragungssicherheit kann somit eine Garantie ausgesprochen werden. Damit ist TTEthernet nach Definition echtzeitfähig.

Anforderung 3 - Unterstützung multipler Nachrichtenklassen mit unterschiedlichen Prioritäten: TTEthernet unterstützt, wie im Kapitel Stand der Technik erläutert, drei Nachrichtenklassen mit unterschiedlichen Prioritäten. Diese können zur Übertragung verschiedenster Daten mit unterschiedlichsten (Echt-)zeitanforderungen genutzt werden. Hardwareseitig bietet beispielsweise das bereits erwähnte TTE Switch Module A664 Pro von TTTech eine volle Kompatibilität mit diesen drei Nachrichtenklassen an (siehe Abbildung 4.1). Hier wird Standard Ethernet Datenverkehr nach IEEE 802.3 als Best Effort Datenverkehr unterstützt. Ebenso werden Rate-Constrained Datenverkehr nach ARINC 664 Part 7 und Time-Triggered Datenverkehr nach SAE AS6802 voll unterstützt.

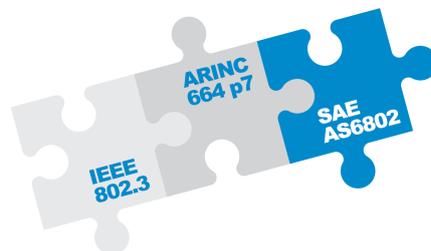


Abbildung 4.1: Die drei Nachrichtenklassen des TTEthernet [6]

Anforderung 4 - Beibehalten von vorhandenem Bauvolumen und Masse: Auch hier bietet sich ein Blick auf vorhandene Hardware an. Das TTE Switch Module A664 Pro ist beispielsweise nur 94,4mm lang und 70mm breit. Dabei weist es eine Höhe von gerade einmal 14,5mm auf [6]. Die Gesamtmasse dieses Switch Modules beträgt dabei 131g. Ein TTEthernet Endsystem wiegt mit 115g exakt so viel ein AFDX Endsystem der gleichen Firma. Mit dieser geringen Gesamtmasse und den kompakten Abmaßen, steht die TTEthernet Hardware der AFDX Hardware in nichts nach und ein Einsatz in Passagierflugzeugen ist möglich.

Anforderung 5 - Austauschbarkeit von Komponenten ohne Netzwerk-Neukonfiguration: Normalerweise wird einem Bauteil eine feste Media Access Control (MAC)-Adresse vom Hersteller zugewiesen (auch Universally Administered Address (UAA) genannt). Diese ist für jedes Bauteil einmalig auf der Welt. Es besteht jedoch die Möglichkeit diese Adresse mit einer Locally Administered Address (LAA) zu überschreiben.

Bei Verwendung der UAA müsste nach Tausch eines Bauteils auf die neue UAA verwiesen werden. Weißt man dem Bauteil jedoch eine LAA zu, so kann diese vom alten Bauteil übernommen werden und es bedarf keiner Anpassung in der Software. Diese Praxis wird bereits unter AFDX verwendet [23].

Anforderung 6 - Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen: Wie im Kapitel Analyse der Anforderungen beschrieben, gibt es mehrere Wege die Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen nachzuweisen. Einer dieser Wege ist die DO-160G. Wenn die entsprechenden Richtlinien entweder nach DO-160G oder auf eine andere Art, nachweislich erfüllt wurden, steht dem Einsatz in der Luftfahrt nichts im Wege.

Die bereits bestehende Hardware, hier sei wieder auf die Produkte von TTTech verwiesen, ist beispielsweise nach diesen Anforderung zertifiziert [5] [4].

Tabelle 4.2 fasst den Erfüllungsgrad der Anforderungen durch TTEthernet nochmals zusammen. Alle Anforderungen sind erfüllt.

Anforderungen momentan nicht erfüllt	Anforderungen erfüllt
ID	Anforderung
1	Nachweis der Lufttüchtigkeit (CS25/FAR25)
2	Echtzeitfähigkeit mit definierter Latenz und definiertem Jitter
3	Unterstützung multipler Nachrichtenklassen mit unterschiedlichen Prioritäten
4	Beibehalten von vorhandenem Bauvolumen und Masse
5	Austauschbarkeit von Komponenten ohne Netzwerk-Neukonfiguration
6	Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen (bspw. nach DO-160G)

Tabelle 4.2: Auswertung von TTEthernet gegen die Anforderungen

4.1.2 Time Sensitive Networking

Anforderung 1 - Nachweis der Lufttüchtigkeit: Wie der Kontakt mit der Firma EKF ergab, wird aktuell aktiv an Ethernet Switches, speziell für Avionik Anwendungsfälle, entwickelt. Diese sollen Echtzeitfähigkeit mittels TSN bieten. Aktuell ist diese Hardware aber noch nicht verfügbar. Auch die Recherche bei anderen Anbietern (CISCO, Kontron) ergab, dass aktuell TSN noch rein in der Industrieautomation verwendet wird. Somit gibt es bisher keine auffindbare Hardware und Software, welche nachweislich lufttüchtig ist.

Anforderung 2 - Echtzeitfähigkeit mit definierter Latenz und definiertem Jitter: Durch die Verwendung von Zeitsynchronisation und eines Schedules, welcher nach festgelegten Regeln die Übertragung der einzelnen Nachrichtenklassen steuert, fällt sowohl die Latenz als auch der Jitter bei TSN vorhersagbar gering aus. Durch diese Vorhersagbarkeit werden Determinismus und Echtzeitfähigkeit gewahrt.

Anforderung 3 - Unterstützung multipler Nachrichtenklassen mit unterschiedlichen Prioritäten: TSN bietet, mit CDT, AVB class-A und class-B, drei Echtzeit-Nachrichtenklassen an. Diese stehen für Echtzeitdatenverkehr mit unterschiedlichen Zeitanforderungen zu Verfügung. Weiterhin kann nicht-echtzeitfähiger

Datenverkehr als BE Datenverkehr abgewickelt werden.

Anforderung 4 - Beibehalten von vorhandenem Bauvolumen und Masse: Da bisher scheinbar keine luftfahrttüchtige Hardware basierend auf TSN auf dem Markt ist, kann hierzu keine gesicherte Aussage getroffen werden.

Anforderung 5 - Austauschbarkeit von Komponenten ohne Netzwerk-Neukonfiguration: Hier kann das Verfahren der LAA MAC-Adresse herangezogen werden, wie es bereits unter TTEthernet beschrieben wurde.

Anforderung 6 - Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen: Da bisher noch keine luftfahrttüchtige Hardware auf dem Markt ist, ist eine gesicherte Aussage zu dieser Anforderung nicht möglich. Allerdings gelten auch in der Industrieautomation Richtlinien zu beispielsweise EMV, ESD sowie Spannungsfestigkeit. Daher muss im Einzelfall betrachtet werden, welche Anforderungen bestehende Hardware aus der Industrieautomation bereits erfüllt und ob diese mit den Anforderungen der Luftfahrt übereinstimmen. Je nach Größe der Diskrepanz ist es für Hersteller wirtschaftlich, bestehende Hardware auch für den Luftfahrtmarkt zu weiter zu entwickeln.

In Tabelle 4.3 ist folgend der Erfüllungsgrad der Anforderungen farblich dargestellt. Dabei entspricht ein grün hinterlegtes Feld einer Erfüllung der Anforderung. Ein gelb hinterlegtes Feld weist darauf hin, dass die entsprechende Anforderung aktuell nicht erfüllt ist.

ID	Anforderung
1	Nachweis der Lufttüchtigkeit (CS25/FAR25)
2	Echtzeitfähigkeit mit definierter Latenz und definiertem Jitter
3	Unterstützung multipler Nachrichtenklassen mit unterschiedlichen Prioritäten
4	Beibehalten von vorhandenem Bauvolumen und Masse
5	Austauschbarkeit von Komponenten ohne Netzwerk-Neukonfiguration
6	Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen (bspw. nach DO-160G)

Tabelle 4.3: Auswertung von TSN gegen die Anforderungen

Aktuell sind nicht alle Anforderungen erfüllt. Ein Einsatz von TSN in der Luftfahrt ist zu diesem Zeitpunkt nicht möglich.

4.2 Zwei-Draht Ethernet

In diesem Unterkapitel geht es um die Bewertung der Leistungsfähigkeit von SPE, beziehungsweise dessen Vor- und Nachteile im Vergleich zu anderen Umsetzungen wie beispielsweise Controller Area Network (CAN).

Die gelisteten Anforderungen in Tabelle 4.1, sind auf Technologien des Data Link Layer (Schicht 2) zugeschnitten. SPE spiegelt hingegen den Physical Layer wider. Daher macht es keinen Sinn, die Anforderungen aus Tabelle 4.1 eins-zu-eins auf SPE anzuwenden.

So werden beispielsweise Echtzeitfähigkeit und die Unterstützung multipler Nachrichtenklassen (Anforderungen 2 und 3), von den darüber liegenden Schichten des Referenzmodells gesichert.

Die wichtigsten Anforderungen für die Hardware stellen die einzelnen Anwendungsfälle. Anforderungen sind hier beispielsweise Bauraum, Bandbreite, Kabellänge und

ähnliches. Diese Anforderungen lassen sich allerdings nicht verallgemeinern, sondern müssen von Anwendungsfall zu Anwendungsfall untersucht werden.

Wie im Kapitel Stand der Technik bereits erläutert bietet SPE extrem hohe Bandbreite bei Nutzung von nur einem einzelnen Adernpaar. Dabei stehen Bandbreite und verfügbare Leitungslänge allerdings immer im Kontrast (siehe Abbildung 4.2). Hierbei werden nur Leitungslängen von geschirmten Leitungen betrachtet.

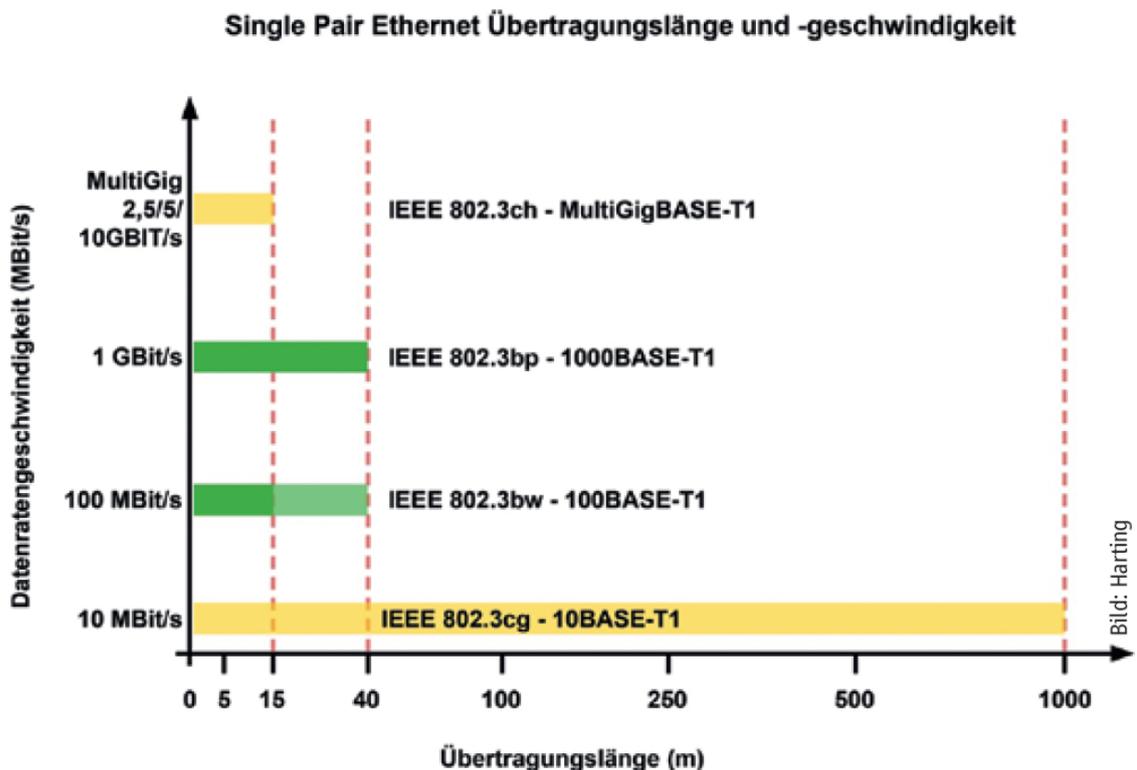


Abbildung 4.2: Überblick über SPE Standards und deren Zusammenhänge zwischen Leitungslänge und Bandbreite (Grün: Bereits in IEEE 802.3; Gelb: Noch in der Normungsphase) [49]

Bandbreiten von bis zu 10Gbit/s sind realisierbar, aber auch mit einer drastischen Reduzierung der Leitungslänge verbunden. Hier sind nur maximal 15 Meter Leitungslänge möglich. Durch die Reduzierung auf 1000 Base-T1 (1Gbit/s), steht bereits eine maximale Leitungslänge von 40 Metern zu Verfügung. Damit eignet sich diese Netzwerkausführung zur Verdrahtung von Teilsystemen. 100 Base-T1

bietet die gleichen möglichen Leitungslängen wie auch 1000 Base-T1. Hier erlaubt eine Reduzierung der Bandbreite ausnahmsweise keine Erhöhung der Leitungslängen. Bei der Verwendung von 10 Base-T1 sind hingegen Leitungslängen bis 1000 Metern möglich [49].

Angemerkt sei hier, dass sowohl MultiGigBase-T1 als auch 10 Base-T1 bereits als Technologie existieren, aber noch nicht in die IEEE 802.3 aufgenommen wurden. Diese beiden Standards befinden sich noch in der Normungsphase der IEEE, welche allerdings zeitnah beendet sein sollte [49].

Mit SPE steht nun eine konkurrenzfähige Technologie in den Startlöchern, welche ältere Technologien wie CAN oder Flexray in vielen Aspekten die Stirn bieten kann. CAN bietet selbst im High-Speed CAN Bereich nur Bandbreiten um 1Mbit/s. Hier ist beispielsweise, nach abgeschlossener Normung unter IEEE 802.3, 10 Base-T1 eine Alternative. Es bietet im Vergleich zu High-Speed CAN die zehnfache Bandbreite. Dazu bieten mögliche 1000 Meter Leitungslänge viel Flexibilität bei verschiedensten Verdrahtungsanwendungen, insbesondere wenn man bedenkt, dass High-Speed CAN 1Mbit/s nur auf Leitungslängen bis 40 Metern nutzen kann. Danach sinkt die nutzbare Bandbreite von High-Speed CAN mit steigender Leitungslänge ab. Bis 100 Meter stehen noch 500kbit/s zu Verfügung, darüber sind es nur noch 125kbit/s. Hier liegt also ein immenser Vorteil von SPE, deutlich höhere Bandbreite kann auf deutlich längerer Leitungslänge genutzt werden. Befinden sich Anwendungen aktuell mit CAN im Leitungslängenbereich unter 40 Metern, so kann hier mit 1000 Base-T1 die 1000-fache Bandbreite zu Verfügung gestellt werden.

Ähnliche sieht die Situation für Anwendungen aus, die aktuell über FlexRay, oder entsprechende Bussysteme mit Bandbreiten um die 10Mbit/s, realisiert werden.

Werden die rein physikalischen Abmaße betrachtet, so ist SPE ebenfalls eine valide Alternative zu CAN. Bei Verwendung von Kupferleitungen setzt CAN bekanntlich ebenfalls auf ein verdrehtes Adernpaar (CAN-High und CAN-Low). Wobei allerdings noch eine Masseleitung dazu kommt. Hier steht SPE - mit seinem Single Twisted Pair - CAN in nichts nach.

Im Einzelfall muss dennoch geprüft werden, ob beispielsweise Eigenschaften wie die Gleichtaktunterdrückung beim CAN notwendig sind und SPE mit den vorhandenen Störfestigkeiten mithalten kann.

Ebenso muss für jeden Einzelfall geprüft werden, ob der Wechsel von einer Lini-entopologie (bei CAN) zu einer Sterntopologie (Ethernet) machbar ist und ob die Switches - trotz ihrer geringen Abmaße - entsprechend verbaut werden können.

Zusammenfassend gilt, dass SPE für viele Zweidraht-Bussysteme und sogar einige Mehrdraht-Bussysteme eine Alternative mit deutlicher Bandbreiten Reserve darstellen kann und dabei beispielsweise gegenüber CAN keine zusätzlichen Adern verbaut werden müssen.

4.2.1 Kombinierbarkeit von TSN und SPE

Wie im Kapitel Stand der Technik bereits dargelegt, arbeitet beispielsweise die Firma EKF an Ethernet-Switches, welche in der Avionik Anwendung finden sollen und dabei sowohl Echtzeitfähigkeit mittels TSN bieten als auch SPE als Schnittstelle unterstützt. Bei den bisherigen Produkten für die Industrieautomation wird auf die Steckgesichter von Weidmüller und Phoenix Contact bzw. Harting, TE Connectivity und Horise Electric zurückgegriffen. Diese Steckgesichter sind für den harten Einsatz in der Industrieautomation entwickelt, bieten Schutzklassen bis IP67 und ein breites Temperaturspektrum. Ob diese auch Anwendung in der Luftfahrt finden können, oder eigenständige Steckgesichter entwickelt werden müssen, ist aktuell nicht absehbar.

Da die Normung der SPE Steckgesichter erst im letzten Quartal des Jahres 2019 abgeschlossen wurde, beginnen viele Firmen erst jetzt mit den Entwicklungsprozessen. Ob und wann die Kombination dieser beiden Technologien in breiterer Masse auf den Markt kommen wird ist somit bisher ungewiss.

4.2.2 Kombinierbarkeit von TTEthernet und SPE

Zum aktuellen Zeitpunkt ist keine Hardware bekannt, welche TTEthernet unterstützt und gleichzeitig SPE als Anschlussmöglichkeit bietet.

Wie bereits angesprochen, ist die Normung der SPE Steckgesichter noch sehr frisch. Auch hier mag in den nächsten Jahren noch entwickelt werden.

4.3 Potenzial in der Luftfahrt

Wie in den vorausgegangenen Abschnitten des Kapitels erläutert, unterscheiden sich TTEthernet und TSN im Erfüllungsgrad der gesetzten Anforderungen.

Dabei erfüllt TTEthernet alle Anforderungen, welche an Schicht 2 gestellt wurden. Eine Kompatibilität zu SPE bleibt TTEthernet momentan jedoch schuldig.

TSN bietet zwar Kompatibilität mit SPE, erfüllt jedoch wiederum nicht alle Anforderungen welche an eine Schicht 2 Technologie - zu Beginn dieser Arbeit - gestellt wurden.

Dennoch bietet sich eine nähere Betrachtung an. Hier sollte weiter herunter gebrochen werden, als dass nur eine Erfüllung oder Nicht-Erfüllung der Anforderungen zum aktuellen Zeitpunkt betrachtet wird.

Aus technischer Sicht scheint es möglich, dass TSN die Anforderungen erfüllen kann. Umsetzungen in der Industrieautomation bestehen und Entwicklungen für eine Anwendung in der Luftfahrt sind in der Pipeline. Dies geht zumindest aus der Kommunikation mit Firmen hervor. Hier wird jedoch weiterer Entwicklungsaufwand benötigt und somit noch einige Zeit bis Marktreife verstreichen.

Ein Potenzial von TSN ist erkennbar, indem Sinne, dass Firmen Ressourcen in die Weiterentwicklung setzten. Dies macht wirtschaftlich keinen Sinn, würden diese Firmen nicht an den Erfolg von TSN glauben.

Bereits jetzt weisen TSN-Switches aus anderen Industriezweigen die Fähigkeit auf PoE bzw. PoDL zu nutzen. Auch dies bietet gewisses Potenzial für die Versorgung kleinerer Verbraucher in der Flugzeugkabine.

Durch die Fähigkeit größere Bandbreiten, als bisher genutzte Bussysteme, zu Verfügung zu stellen, eröffnen sich auch neue Möglichkeiten für die zunehmende Integration. Wenn verschiedene Anwendungen, welche bisher mit unterschiedlichen Bussystemen umgesetzt wurden, in ein einheitliches Echtzeit-Ethernetnetzwerk integriert werden können, bietet dies enormes Einsparpotenzial in den unterschiedlichsten Aspekten. Angenommen es wird nur noch ein einheitliches System genutzt, so können Flugzeugausstatter von diesen Komponenten deutlich höhere Stückzahlen abnehmen, was meist eine Verringerung der Stückkosten bedeutet. Auch im Personalbereich wird nicht für jedes Nisches-Bussystem mehr ein eigenes Expertenteam benötigt. Die Schwierigkeiten der Datenübertragung von einem Bussystem ins nächste fallen ebenfalls weg. Das benötigte Know-How wird verringert.

5 Konzeption von Beispielanwendungen

In diesem Kapitel werden Anwendungen innerhalb der Kabine betrachtet, welche bis dato nicht einheitlich mittels Ethernet umgesetzt sind, aber theoretisch ein passendes Einsatzfeld dafür darstellen. Hierbei soll der Fokus auf der Umsetzung mittels TTEthernet liegen, da dieses in der vorangegangenen Bewertung am besten abschnitt. Ein Blick über den Tellerrand hinaus ist dennoch immer sinnvoll und wird wenn passend ebenfalls betrachtet.

5.1 Findung und Auswahl von Anwendungen

Um mögliche Anwendungen innerhalb der Flugzeugkabine zu finden wurde eine Brainstorming Session durchgeführt, aus welcher die folgenden Ergebnisse hervorgingen:

- Lichtsteuerung (Boeing Sky Interior, Airbus Airspace)
- Attendant Indication Panels (AIP)
- Area Call Panels (ACP)
- Passenger Service Unit (PSU) bzw. Passenger Interface Supply Adapter (PISA)
- Rauchmelder
- Inflight Entertainment (IFE)

All die gesammelten Anwendungsfälle, IFE ausgenommen, sind im Cabin Intercommunication Data System (CIDS) implementiert (siehe dazu Abbildung 5.1). Das CIDS ist ein System, welches über Datenbusleitungen die Hauptsysteme der Flugzeugkabine ausführt, steuert und überwacht.

Bei dieser Betrachtung fällt auf, dass das CIDS somit ein Musterbeispiel für die

Integration multipler Anwendungen in ein Netzwerk darstellt. Aktuell sind diese Anwendungen nicht einheitlich umgesetzt. Im CIDS kommen AFDX, CAN und eine - von Airbus - speziell modifizierte Variante des Ethernet als Linientopologie zum Einsatz.

Es bietet sich somit an das CIDS als Gesamtnetzwerk auf die Umrüstung auf TTEthernet zu untersuchen. Konkrete Anwendungen können helfen, Vor- und Nachteile in einzelnen Bereich aufzudecken und dienen generell als Anschauungsbeispiel zur Umrüstung.

Wie aufgelistet, kommen für die Umsetzung mittels Ethernet viele Komponenten des CIDS infrage. Da die PSU den meisten Kontakt mit dem Passagier bietet, eignet sich diese Komponente als repräsentativster Anwendungsfall. An dieser Komponente wird in Unterkapitel 5.2 eine mögliche Umrüstung auf TTEthernet skizziert.

Im zweiten Unterkapitel 5.3, wird der Anwendungsfall der Rauchererkennung analog betrachtet.

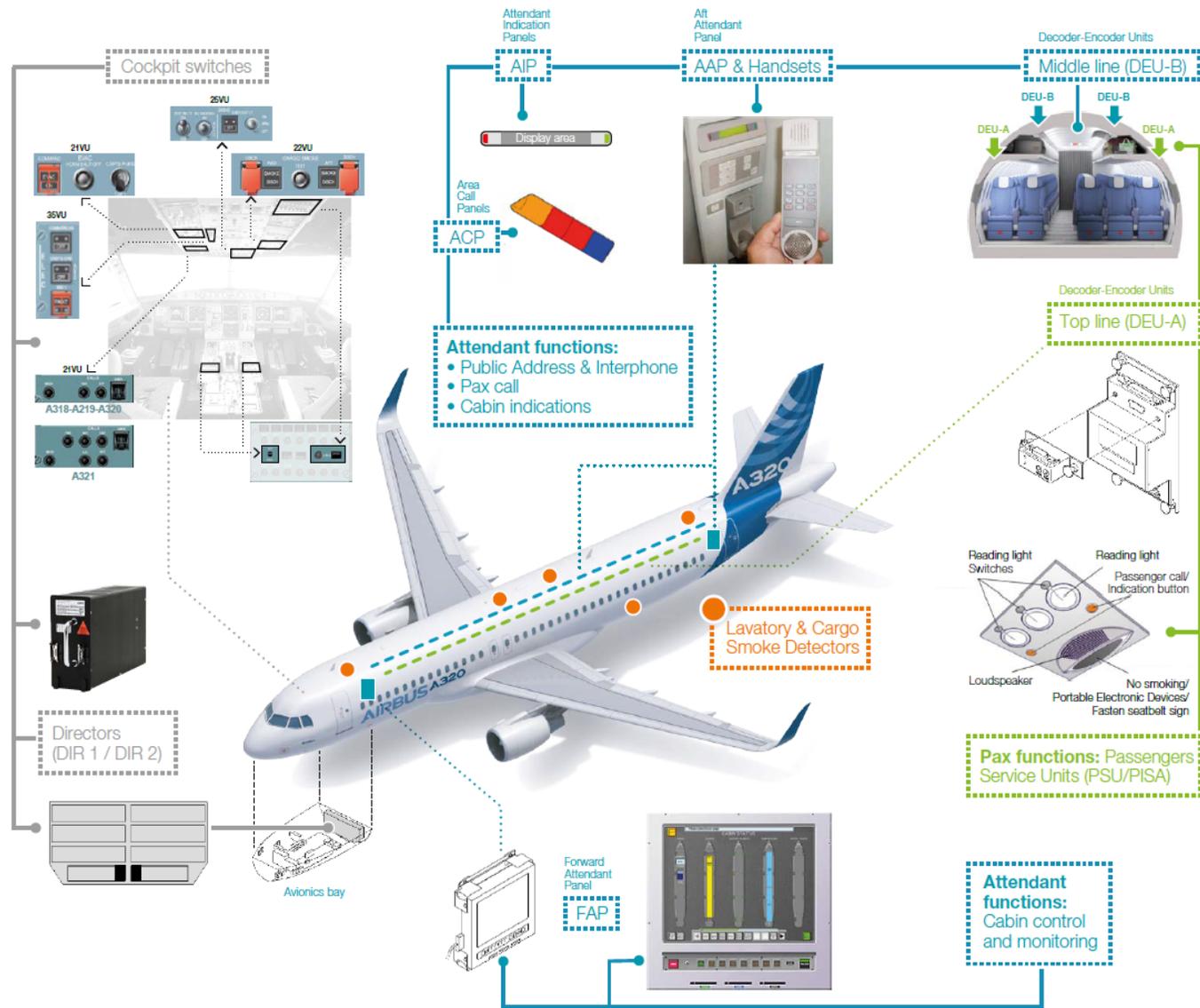


Abbildung 5.1: Überblick über Komponenten und deren Vernetzung des CIDS [24]

5.2 Passenger Service Unit

5.2.1 Grundlagen

Eine PSU hat jede Person bereits gesehen, die mit einem modernen Passagierflugzeug geflogen ist. Diese Einheiten befinden sich über jeder Sitzreihe und beinhalten die Leselichter, Anschnall- und Rauchverbotszeichen, einen Lautsprecher sowie den Attendant Call Button zum Rufen einer Flugbegleiterin oder eines Flugbegleiters (siehe Abbildung 5.2).



Abbildung 5.2: Einzelne Passenger Service Unit aus der Airbus A320-Familie [22]

Der PISA ist die elektrische Schnittstelle der PSU, welche die Verbindung zu der dahinter liegenden Decoder Encoder Unit (DEU) realisiert [22]. Die DEU spielt dabei wiederum die Schnittstelle zum Datenbus des CIDS (siehe Abbildung 5.3).

Hier existieren zwei unterschiedliche Ausführungen. Zum einen die DEU-A's, welche dem Top-Line Bus zugeordnet sind, und des weiteren die DEU-B's, die dem Middle-Line Bus angehören. Diese Typen unterscheiden sich hauptsächlich in ihrem Einsatzspektrum. Mit dem Passagier interagierende Komponenten sind mittels DEU-A und dem Top-Line Bus verbunden, so wie die hier dargestellte PSU. Über DEU-B und den Middle-Line Bus werden Funktionen realisiert, welche der Crew zur Kommunikation und Unterstützung dienen. Darunter beispielsweise Area Call Panels, Attend Indication Panels, Interphones, aber auch die zentrale Lichtsteuerung. Das CIDS bildet in Airbus Flugzeug das übergeordnete System der Kommunikation zwischen Cockpit- / Kabinenbesatzung untereinander und den Passagieren. Des weiteren ermöglicht es der Kabinenbesatzung die Steuerung des Lichtes sowie die Überwachung verschiedenster Parameter der Kabine [24]. Als Mensch-Maschine-Schnittstelle hierfür dient der Crew wiederum das Forward Attendent Panel (FAP). Alle Daten laufen bei einem Paar Hauptrechner zusammen. Diese werden Director 1 und Director 2 genannt. In einigen Airbus Flugzeugen wie der A380 existiert noch ein dritter Director. Dieser bleibt hier allerdings außen vor. Hierbei handelt es sich um eine redundante Auslegung, sodass beim Ausfall eines Directors der zweite Director einspringen kann. Da die Directors auf den Erhalt binärer Daten angewiesen sind, ist es Aufgabe der DEUs die Daten entsprechend zu konvertieren. Während sich die Kabinenbesatzung um Licht- und Temperatursteuerung sowie die Passagier Rufe kümmert, werden die Anschnallzeichen und die Rauchverbotszeichen direkt aus dem Cockpit gesteuert.

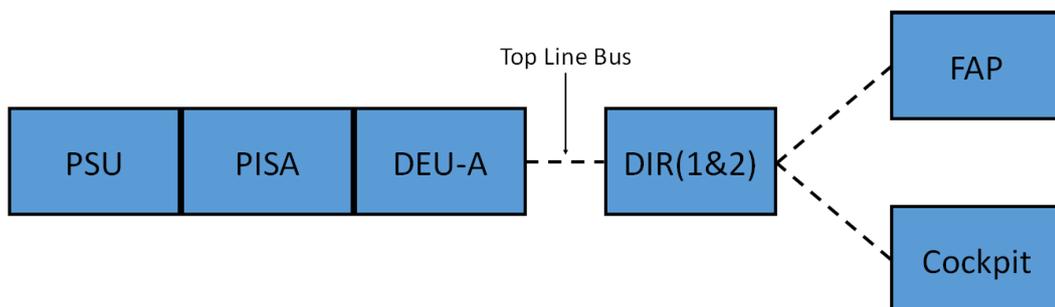


Abbildung 5.3: Topologie der beschriebenen Komponenten, welche die Verbindung jeder PSU sichern

5.2.2 Mögliche Umsetzung

Wie aus den vorhergehenden Kapiteln hervorgeht, ist TTEthernet aktuell die sinnvollere Technologie. Deshalb wird folgend eine mögliche Umsetzung mit eben dieser Technologie skizziert.

Dazu wird die aktuelle Architektur verworfen und eine Switched Ethernet Architektur entwickelt (siehe Abbildung 5.4). Hierbei ist nun der Ethernet Switch die zentrale Komponente. In Abbildung 5.4 ist zur vereinfachten Darstellung nur ein Switch dargestellt. Es können aber auch mehrere Switches zwischen den Komponenten liegen - Multi-Hop Verbindung. Ebenso ist eine redundante Auslegung der gesamten Switched Ethernet Architektur möglich und sinnvoll.

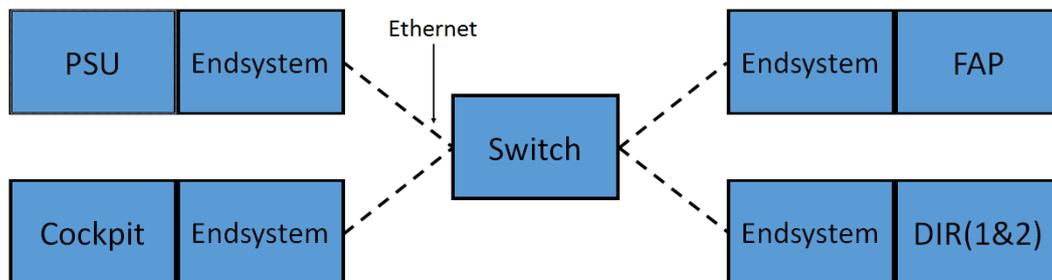


Abbildung 5.4: Topologie nach Umbau auf eine Switched Ethernet Architektur

Während Bedien- und Anzeigeelemente, welche nur einmal vorhanden sind von einer Stern-Topologie -wie sie mit TTEthernet eingeführt wird- profitieren würden, so birgt dies auch Nachteile für Komponenten welche in multipler Anzahl vorhanden sind und sich durch die gesamte Länge der Kabine ziehen. Die PSUs profitieren ganz klar von einer Linien-Topologie, wie sie aktuell mit dem Top-Line Bus umgesetzt ist. Hier gibt es eine Top-Line Bus Leitung, an die mehrere DEU-A angeklemt sind, welche wiederum die Verbindung zu PISA und PSU herstellen (vergleiche Abbildung 5.3).

Die aktuelle Umsetzung hat aber auch einen Nachteil. Innerhalb der DEUs sitzen Transformatoren. Jeder dieser Transformatoren zieht unweigerlich Leistung aus dem Top-Line Bus. Somit ist diese Umsetzung auch nicht für eine unbegrenzte Zahl an Sitzreihen möglich.

Bei der Umsetzung als Switched Ethernet Architektur, bieten sich nun mehrere Lösungsmöglichkeiten an.

Zum einen eröffnet sich die Möglichkeit die Anzahl der Switches gering wie möglich zu halten und somit Kosten in der Anschaffung zu minimieren. Hierbei muss aber jede PSU und somit jedes Endsystem einzeln mit dem Switch verbunden werden. Dadurch vervielfacht sich auch die Zahl der Leitungen und somit wiederum die Kosten und das Gewicht (siehe Abbildung 5.5). Dies geht natürlich nur in einer solchen Anzahl wie der Switch physikalische Anschlüsse besitzt.

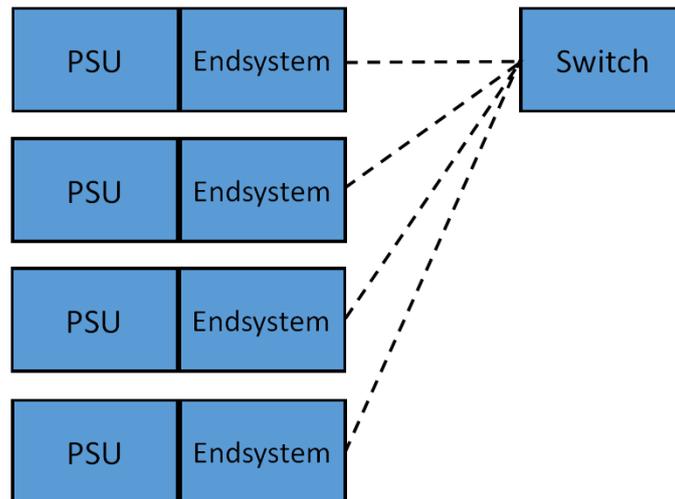


Abbildung 5.5: Umsetzung mit wenigen Switches und dafür multiplen langen Leitungen

Als zweite Lösungsmöglichkeit bietet sich ein eins-zu-eins Ersatz der DEU-A mit jeweils einem eigenen Switch an. So kann man eine Topologie beibehalten, welche der Linien-Topologie des Top-Line Bus ähnelt. Nachteile hierbei sind die gestiegenen Anschaffungskosten durch erhöhte Anzahl an Switches und das Gewicht was jeder Switch mitbringt. Dafür fallen die einzelnen Leitungsabschnitte kürzer aus (siehe Abbildung 5.6).

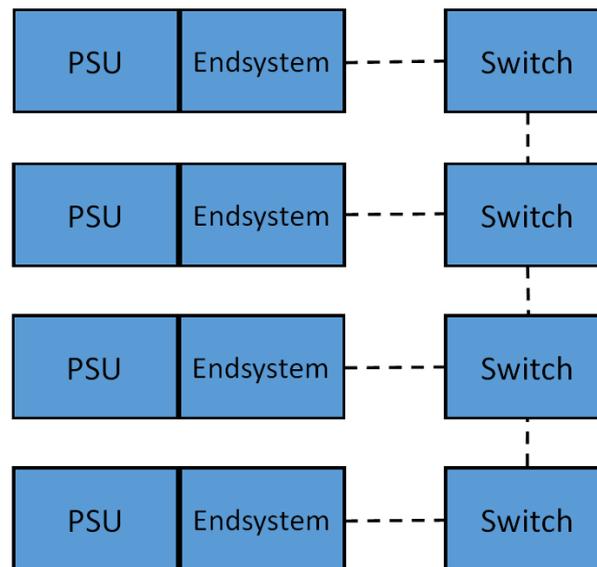


Abbildung 5.6: Umsetzung mit mehreren Switches und dafür kurzen Leitungen

Der dritte und wahrscheinlich sinnvollste Weg, ist eine Art Kompromiss aus den ersten beiden Ausführungen, bei welchem das Hauptaugenmerk aber nicht auf der Vollbestückung der verbauten Switches liegt, sondern eine wirtschaftliche Balance aus größtmöglicher Nutzung der Switches und gleichzeitiger Vereinfachung der Verdrahtung besteht. Hierbei werden immer Kabinenabschnitte zusammengefasst und einem Switch zugeordnet.

Der bereits im Laufe dieser Arbeit zitierte Switch der Firma TTEch (TTE Switch Module A664 Pro) besitzt beispielsweise folgende Schnittstellen:

- 6x 10/100/1000 Mbit/s full-duplex Ethernet (via QSGMII)
- 18x 10/100 Mbit/s full-duplex Ethernet (via QSGMII)

Da eine Bandbreite von 1000 Mbit/s für diese Anwendung nicht nötig ist, kann auf die zweite Anbindungsart zurück gegriffen werden. Hier werden 18 Anschlüsse geboten, womit 18 PSUs - an entsprechenden Ethernet Endsystemen - pro Switch angebunden werden können.

Der physikalische Anschluss wird hier mittels QSGMII (Quad Serial Gigabit Media-Independent Interface) realisiert. Diese Anschlussart kombiniert vier SGMII (Serial Gigabit Media-Independent Interface) miteinander, reduziert damit die Leitungsanzahl im Vergleich zu vier separat verlegten SGMII Leitungen.

Durch Verwendung der zweiten Anbindungsart ergeben sich mit zwei Switches somit 36 Anschlussmöglichkeiten für jeweils eine PSU. In Abbildung 5.7 ist dies

am Beispiel einer Airbus A320neo Kabine mit 32 Sitzreihen - wie beispielsweise von Lufthansa aktuell verwendet - visualisiert. In der Abbildung ist nur eine Seite der Kabine angeschlossen, gleiches Prinzip gilt selbstverständlich auch für die gegenüberliegende Seite der Kabine. Somit könnten alle PSUs in einer Airbus A320(ceo/neo) Kabine mit nur vier Switches angesteuert werden.

Bei Kabinen mit mehr als 36 Sitzreihen muss entsprechend ein Switch mehr pro PSU Reihe eingeplant werden. Dies ist zum Beispiel bei der Airbus A321(ceo/neo) der Fall, welche von vielen europäischen Airlines in einer Konfiguration mit 38 Sitzreihen verwendet wird. Bei Großraumflugzeugen mit zwei Gängen, müssen für die mittleren Sitze und deren PSUs entsprechend weitere Switches eingeplant werden.

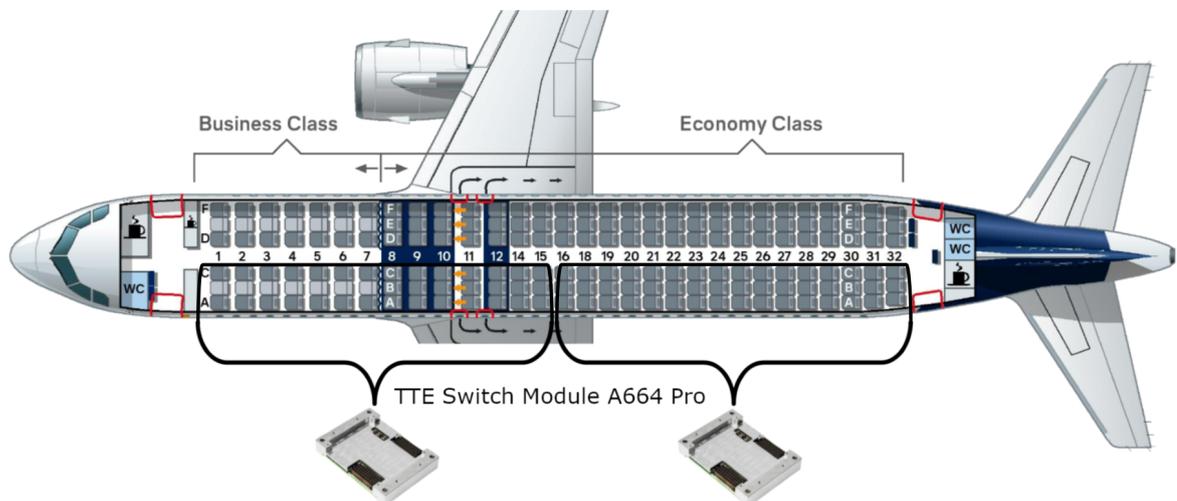


Abbildung 5.7: Mögliche Vernetzung der PSUs einer Airbus A320neo mit 32 Sitzreihen und dem TTE Switch Module A664 Pro [3]

Nicht alle Funktionen der PSU sind gleich wichtig. Geht der Befehl des Passagiers das Leselicht einzuschalten verloren oder läuft diese Nachricht mit einer langen Latenz durch das System, so ist dies maximal mit einer Unannehmlichkeit für den betreffenden Passagier verbunden. Anders ist es, wenn beispielsweise die Nachricht zum Einschalten der Ansnallzeichen verloren geht oder im schlimmsten Fall der Befehl zur Evakuierung des Flugzeugs nicht alle Passagiere erreicht.

Hier bietet sich die Nutzung der verschiedenen Nachrichtenklassen an - welche TTEthernet mit sich bringt - um sicherzustellen, dass Nachrichten mit hoher Priorität garantiert übermittelt werden .

Dazu ist in Tabelle 5.1 beispielhaft aufgeschlüsselt, welche Anwendungen durch ihre Kritikalität in welches DAL fallen.

Classification	Examples of cabin related systems
No effect DAL E	IFE, GSM on Board, Satcom Internet Access, ...
Minor DAL D	Cabin Illumination, Water/waste Indication, ...
Major DAL C	Cabin Crew Interphone, Passenger Address, PAX Call, Air conditioning, ...
Hazardous DAL B	Smoke Detection, ...
Catastrophic DAL A	Cabin Pressure Control, Doors & Slides Management, ...

Tabelle 5.1: Beispiele zur Einordnung verschiedener Funktionalitäten in der Kabine in die einzelnen DAL [51]

In Abbildung 5.8 ist dargestellt, welche Funktion der PSU welcher Nachrichtenklasse zugeteilt werden kann, basierend auf den hier angesprochenen Prioritäten und Risiken. Hierbei ist folgendes zu bedenken: Die PSU ist Teil eines größeren Systems. In diesem Beispiel wird das gesamte CIDS Netzwerk auf TTEthernet umgerüstet. Damit macht es keinen Sinn die kritischste Funktion der PSU der zeitkritischsten Nachrichtenklasse zuzuordnen, wenn sich diese Funktion nur in DAL C wiederfindet. Die Time Triggered Nachrichtenklasse sollte also für Nachrichten der DAL A und B offen bleiben.

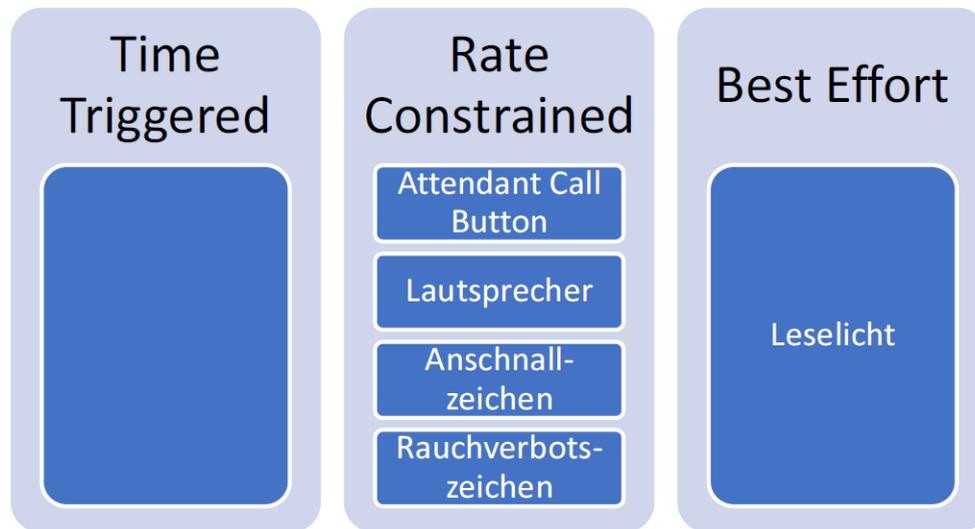


Abbildung 5.8: Mögliche Aufteilung der Funktionen einer PSU auf die unterschiedlichen Nachrichtenklassen von TTEthernet

5.2.3 Ausblick

Auf der Höhe einer jeden PSU (Ausnahme Mittelsitze in Großraumjet mit zwei Gängen) befindet sich ein Leuchtelement, welches durch beleuchten der Wandverkleidung für indirektes Licht in der Kabine sorgt (siehe Pfeil in Abbildung 5.9). Unter der Nutzung von Airbus Airspace und Boeing Sky Interior, bei welchen die Kabine in den unterschiedlichsten Farben beleuchtet werden kann und sogar animierte Sonnenaufgänge und Sonnenuntergänge durch die Kabine laufen, reicht eine einfache Stromversorgung der Leuchtmittel nicht aus. Auch diese Leuchtmittel müssen mittels Datenleitungen mit dem CIDS verbunden werden. Ist hier nicht nur ein einzelnes Leuchtmittel verbaut, sondern eine Einheit mit einzeln ansteuerbaren LED's, so kommen über die gesamte Kabinenlänge schnell große Datenmengen zusammen, welche ein herkömmliches Bussystem bald nicht mehr stemmen kann. Auch hier ist die verfügbare Bandbreite von TTEthernet von Vorteil.

Es ist denkbar die Ansteuerung dieser Beleuchtung an den Kabelstrang der jeweiligen PSU mit anzubinden. Oder die Lampe mit eigenem Endsystem an die Switch-Unterverteilung der PSUs anzukoppeln. So wird keine zusätzliche Datenleitung für diesen Teil der Beleuchtung benötigt.



Abbildung 5.9: Kabinenbeleuchtung in der Nähe der PSU am Beispiel einer Airbus A380 Kabine [19]

Die Nutzung von PoE bzw. PoDL ist aktuell nicht in TTEthernet Hardware implementiert. Sollte dies in der Zukunft noch geschehen, oder lufttuchtige TSN Hardware mit diesem Feature auf den Markt kommen, so könnten auch durch dieses Feature zusätzliche Leitungen zur Energieversorgung eingespart werden. Hier ist die zu Verfügung stehende Leistung im PoE bzw. PoDL Bereich mit 50W-60W noch recht gering. In der Kombination aus energiesparender LED Beleuchtung und einer geringen Zahl an Verbrauchern, vornehmlich in Geschäftsreiseflugzeugen mit wenigen Sitzreihen, könnte dennoch ein Anwendungsfall für PoE bzw. PoDL liegen. Hier könnte die Versorgung der Leseleuchten und die Beleuchtung der Bedienknöpfe über die Datenleitung realisiert werden.

5.3 Rauchmeldesystem

5.3.1 Grundlagen

Um die Gefahren durch Feuer oder Rauchgase so schnell und effektiv wie möglich eindämmen zu können, sind moderne (Passagier-)Flugzeuge mit Rauchmeldern bzw. Rauchmeldesystemen ausgestattet.

Diese Rauchmeldesysteme teilen sich bei Passagierflugzeugen typischerweise in die folgenden Bereiche auf, welche sich in Umfang des Rauchmeldeequipments sowie den Informationsflüssen und Brandbekämpfungsmaßnahmen unterscheiden:

- Passagierkabine und Waschräume
- Frachträume
- Avionics Compartment

Innerhalb des CIDS ist ein Abschnitt nur für die Datenverarbeitung dieser Rauchmeldesysteme verantwortlich. Diese Abschnitt nennt man Smoke Detection Function (SDF) bzw. CIDS-SDF. Diese Datenverarbeitung ist in den Directors ansässig. In der Airbus A380 sind dies drei Stück, wohingegen die A320-Familie nur zwei aufweist.

In jedem Waschraum ist ein Rauchmelder an der Decke verbaut, welcher sich in der Nähe des Luftabzugs befindet. Der Rauchmelder ist mittels CAN-Bus an eine DEU-B angeschlossen, welche wiederum über den Middle-Line Bus mit der CIDS-SDF kommuniziert [8]. Diese Topologie ist in Abbildung 5.10 dargestellt, wobei zur Vereinfachung nur ein Rauchmelder angebunden ist.

Gleiche Funktionsweise gilt auch für das Crew Rest Compartment, den Rückzugsbereich der Crew.

Sollte die CIDS-SDF eine Rauchmeldung empfangen wird eine Kette von Meldungen losgestoßen. Zum einen wird die Meldung der Rauchererkennung an die Piloten im Cockpit weitergeleitet, wobei gleich mehrere Anzeigeelemente eingebunden sind. Zum anderen wird die Besatzung in der Kabine von der Rauchererkennung in Kenntnis gesetzt, indem entsprechende Meldungen auf AIP und ACP angezeigt werden und ein definiertes Warnsignal aus den Lautsprechern in der Kabine kommt (in den folgenden Abbildungen werden diese Elemente vereinfacht als Ausgabegeräte bezeichnet).

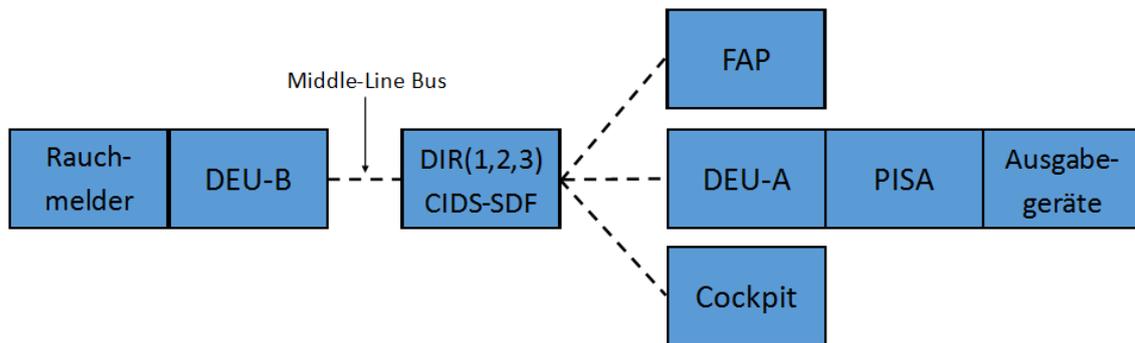


Abbildung 5.10: Aktuelle Topologie des Rauchmeldesystems in der Kabine

In den Frachträumen ist jeweils ein Paar fotoelektrischer Rauchmelder montiert. Detektieren diese Rauch, so wird die Information direkt via CAN-Bus an die CIDS-SDF gesendet. Von hier aus wird die Information via AFDX in das Cockpit geleitet und dort auf verschiedenen Anzeigen dargestellt [8].

Das Belüftungssystem wird darauf hin die von Rauch betroffenen Frachraumsektionen isolieren.

Anders als in der Passagierkabine, kann im Frachraum auch ein Feuerlöschsystem zum Einsatz kommen. Dieses wird vom Cockpit aus, mittels Fire Extinguishing Data Converter (FEDC), angesteuert (siehe auch Abbildung 5.11).

Die Ausführung des Rauchmeldesystems im Avionics Compartment, ähnelt dem der Frachträume, weshalb es hier nicht extra ausgeführt werden soll.

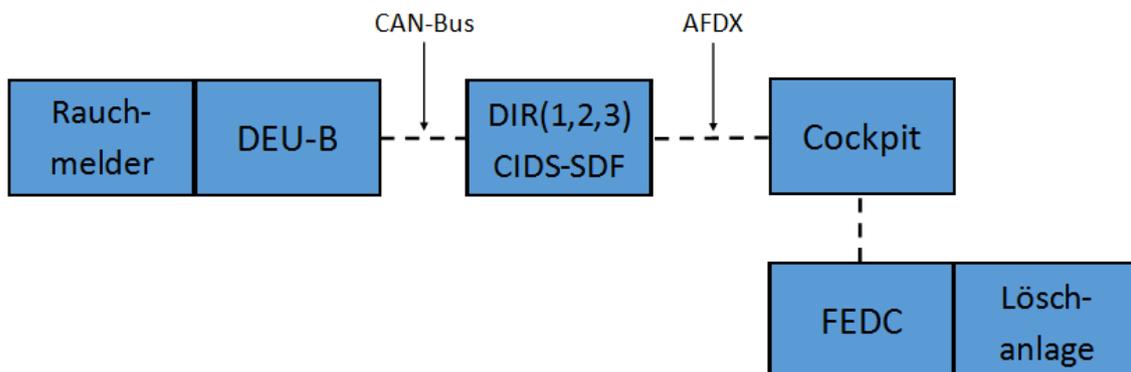


Abbildung 5.11: Aktuelle Topologie des Rauchmeldesystems sowie der Löschanlage in den Frachräumen

5.3.2 Mögliche Umsetzung

Folgend soll eine mögliche Umsetzung, der Umrüstung des Kabinen-Rauchmeldesystems auf TTEthernet, skizziert werden.

Die Umrüstung des CIDS auf TTEthernet ist die gleiche wie im vorherigen Kapitel, am Beispiel der PSU, erklärt.

Auch hier wird die bestehende Architektur gegen eine Switched Ethernet Architektur getauscht. Dabei werden alle TN des Systems mittels entsprechender Endsysteme an die Switches angeschlossen. Abbildung 5.12, mit nur einem zentralen Switch, dient hierbei als vereinfachte Darstellung. Schon aus Gründen der Kritikalität eines Rauchmeldesystems sollten zumindest Teile dieses Netzwerks redundant ausgelegt werden.

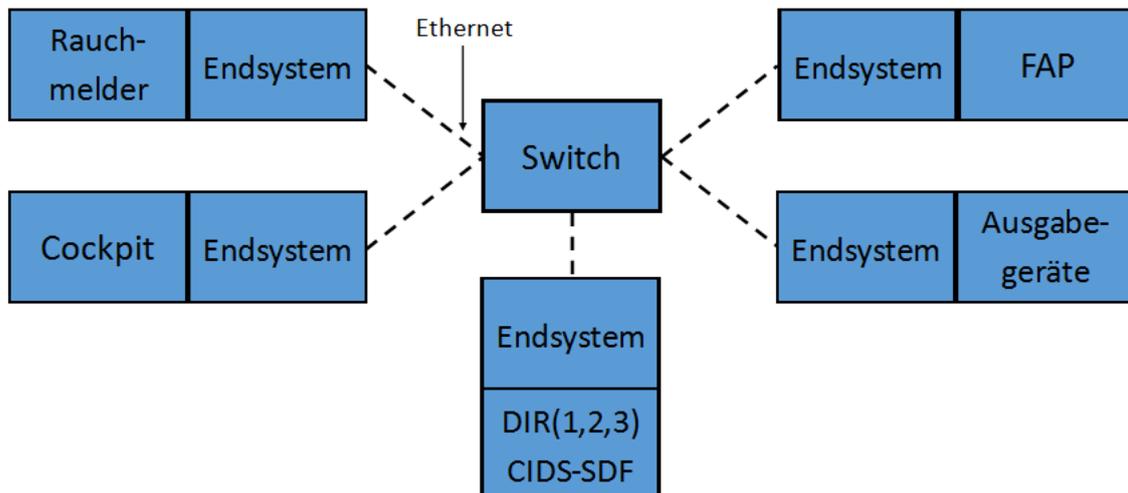


Abbildung 5.12: Mögliche Topologie nach einer Umrüstung auf eine Switched TTEthernet Architektur

Da sowohl die initiale Meldung über Rauch an die CIDS-SDF, als auch die Weiterleitung dieser Information an alle Besatzungsmitglieder essenziell für eine schnelle und effektive Bekämpfung der Gefahr ist, ist es sinnvoll von der höchstpriorisiertesten Nachrichtenklasse Gebrauch zu machen. Diese ist im Falle von TTEthernet die Time-Triggered Nachrichtenklasse (siehe Abbildung 5.13). Diese garantiert, dass Nachrichten das Ziel erreichen und dabei eine definiert geringe Latenz aufweisen.

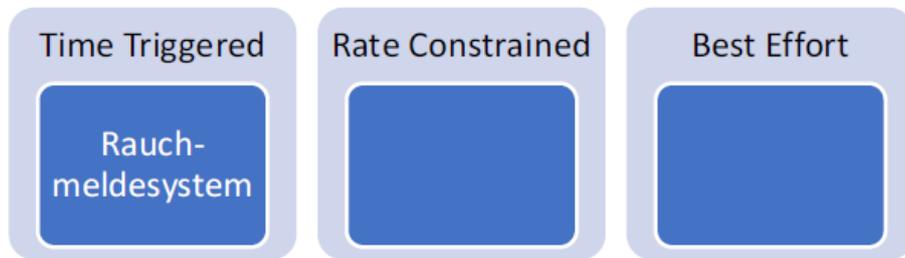


Abbildung 5.13: Einordnung des Rauchmeldesystems in die Nachrichtenklassen von TTEthernet

5.3.3 Ausblick

Da das CIDS bereits eine starke Integration unterschiedlicher Aufgaben in einem Netzwerk aufweist, ist es die perfekte Anwendung um auf ein gesamtes Echtzeitfähiges Ethernet umzurüsten. Verschiedenste Funktionen mit unterschiedlichen Prioritätsansprüchen laufen hier in einem gemeinsamen Netzwerk zusammen.

Dies könnte das Sprungbrett, für eine noch weitergehende Integration innerhalb der Kabine, darstellen.

Abhängig von der Entwicklung im Bereich der echtzeitfähigen Gigabit Standards, könnten noch weitere bandbreitenhungrige Funktionen, wie beispielsweise das IFE integriert werden. Damit würde dem Ziel, eines einzelnen Netzwerkes innerhalb der Kabine, immer nähergekommen werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Durch ihren massiven Vorteil gegenüber herkömmlichen Bussystemen im Bereich der Bandbreite ist zu erwarten, dass echtzeitfähige Ethernetnetzwerke die herkömmlichen Bussysteme immer weiter aus dem Markt verdrängen werden. Besonders im Rahmen der Industrie 4.0 wird sich dieser Trend fortsetzen und auf lange Sicht auch vor der Luftfahrt keinen Halt machen. Die Stärke dieser Verdrängung wird jedoch je nach Anwendungsgebiet unterschiedlich ausfallen.

Besonders bei der Entwicklung neuer Flugzeuge und deren Kabinen, wobei der Trend zu zunehmender Integration geht, werden echtzeitfähige Ethernetnetzwerke durch ihren Bandbreitenvorteil mit gleichzeitigem Determinismus punkten können. Die Möglichkeit vormals getrennte und auf unterschiedlichen Bussystemen basierende Systeme in einem Netzwerk zusammenführen zu können ist ein immenser Gewinn an Wartbarkeit, Industrialisierbarkeit und nicht zuletzt auch Wirtschaftlichkeit.

Wie in dieser Arbeit dargestellt, ist TTEthernet zu diesem Zeitpunkt die bessere Technologie, zum Einsatz in der Flugzeugkabine. Dies ist hauptsächlich dem Entwicklungsvorsprung gegenüber TSN geschuldet. Es ist bereits zertifizierte TTEthernet Hard- und Software auf dem Markt vorhanden.

TSN sollte jedoch nicht abgeschrieben werden. Hier sind in den kommenden Jahren, spannende Entwicklungen zu erwarten.

Diese Aussage bekräftigen besonders die Ziele von Firmen wie EKF, welche an TSN Switches arbeiten, die nicht nur speziell für Anwendungen in der Luftfahrt entwickelt werden, sondern auch noch SPE als physikalische Übertragungsschicht unterstützen.

Eine Kombination aus TSN und SPE scheint in Zukunft eine aussichtsreiche Alternative zu werden. Wird hier noch die Fähigkeit des PoDL/PoE in Betracht gezogen, eröffnen sich Möglichkeiten die Ansteuerung und Stromversorgung von Komponenten zu vereinen.

Aufschlussreich wäre beispielsweise ein Laboraufbau mit SPE-unterstützten

TSN Switches aus der Industrieautomation (solange noch keine lufttüchtigen Varianten erhältlich sind), welche über PoDL bzw. PoE Verbraucher in der Kabine ansteuert. Beispielsweise Leselichter der PSU, wie schon in Kapitel 5.2.3 angeschnitten. Hier könnte verifiziert werden, ob eine solche Umsetzung, bei einer geringen Anzahl an Sitzreihen, sinnvoll realisierbar ist und wo vielleicht doch noch Fallstricke warten.

Allgemein muss auch das Thema der Sicherheit gegenüber Manipulation von außen für TSN und TTEthernet untersucht werden. In Zeiten digitaler Kriegsführung und immer steigenden Zahlen an Online-Kriminalität, muss besonders eine sicherheitskritische Branche wie die Luftfahrt, die genannten Technologien genau beleuchten.

Literaturverzeichnis

- [1] DO-254 - Eine Einführung. ACX GmbH. https://acx-gmbh.de/de/aviation.html?file=files/acx_layout/downloads/DO254.pdf
Aufgerufen am: 15.02.2020.
- [2] IEEE Standards Interpretations for IEEE Std 1588-2008 IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
- [3] Lufthansa Airbus A320neo: Seat map and technical data. https://www.lufthansa.com/content/dam/lh/documents/discover-lufthansa/lufthansa-fleet/32v/201812_A320neo_180.pdf Abgerufen am: 02.04.2020.
- [4] TTE End System A664 Pro (PMC). Produkt-Broschüre der TTTech Computertechnik AG. https://www.tttech.com/wp-content/uploads/TTTech_TTE-Endsystem_A664_Pro-Flyer.pdf Abgerufen am 12.03.2020.
- [5] TTE Switch Module A664 Pro. Produkt-Broschüre der TTTech Computertechnik AG. https://www.tttech.com/wp-content/uploads/TTTech_TTE-Switch_Module_Core_2-1.pdf Abgerufen am: 12.03.2020.
- [6] TTTech Aerospace Core Brochure 2020. Produkt-Broschüre der luftfahrttauglichen Komponenten der Firma TTTech Computertechnik AG. https://www.tttech.com/wp-content/uploads/TTTech_Aerospace-Core-Brochure-1.pdf Abgerufen am 12.03.2020.
- [7] AFDX Protocol Tutorial - AFDX / ARINC 664 Tutorial (1500-049). Condor Engineering Inc., May 2005.
- [8] Training Manual CIDS Maintenance Training Airbus A380. AIRBUS Operations GmbH Technical Services & Customer Training, Feb. 2005. Revision 07 von 03/2013.

- [9] Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes CS-25 Amendment 24. European Union Aviation Safety Agency, Jan. 2010. <https://www.easa.europa.eu/document-library/certification-specifications/cs-25-amendment-24> Abgerufen am: 17.02.2020.
- [10] IEEE Standard for Ethernet, 2015.
- [11] Time-Triggered Ethernet AS6802, Nov. 2016.
- [12] AFDX/ARINC664P7 Tutorial, Feb. 2020. <https://www.aim-online.com/products-overview/tutorials/afdx-arinc664p7-tutorial/> Abgerufen am 09.02.2020.
- [13] Audio Video Bridging Task Group. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Feb. 2020.
- [14] Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Feb. 2020.
- [15] F. Bartols. Leistungsmessung von Time-Triggered Ethernet Komponenten unter harten Echtzeitbedingungen mithilfe modifizierter Linux-Treiber. Bachelor Thesis - Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2010.
- [16] S. Brooks and E. Uludag. Time-Sensitive Networking: From Theory to Implementation in Industrial Automation.
- [17] V. Claus and A. Schwill. *Duden Informatik: Ein Fachlexikon für Studium und Praxis*. Dudenverlag, 2003.
- [18] S. S. Craciunas, R. S. Oliver, M. Chmelik, and W. Steiner. Scheduling Real-Time Communication in IEEE 802.1Qbv Time Sensitive Networks. Technical report, TTech Computertechnik AG, Schönbrunner Straße 7, 1040 Vienna, Austria, 2016.
- [19] A. DeSantis. A380 interior abstract. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=28572369>.
- [20] J. Farkas. IEEE 802.1 TSN - An Introduction. Mentor.IEEE.org, July 2019.
- [21] N. Finn. Introduction to Time-Sensitive Networking. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2(2):22–28, JUNE 2018.
- [22] O. H. Gartzke. Validierung und Verifikation der Integration eines Kabinenmanagementsystem-Mockups. Bachelor Thesis - Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Jan. 2016.

- [23] B. Grunert. Eine Machbarkeitsanalyse für eine Avionics Full Duplex Switched Ethernet - Netzwerkkomponente als eingebettetes System, 2008. Bachelor Thesis - Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg.
- [24] S. Guiraud, T. Schenten, and P. Montanier. Cabin Communication - Architecture, functions and troubleshooting. FAST (Flight Airworthiness Support Technology) 64 - Airbus technical magazine, Oct. 2019.
- [25] B. J. Hauser. *Fachwissen Netzwerktechnik*. Verlag Europa-Lehrmittel, 2018.
- [26] G. Kafka and A. Donner. Netzwerk-Grundlagen - sichere Datenübertragung durch Synchronisierung: Unterschiedliche Verfahren transportieren Daten asynchron, synchron und isochron, Oct. 2007. <https://www.ip-insider.de/unterschiedliche-verfahren-transportieren-daten-asynchron-synchron-und-isochron-a-96167/> Abgerufen am: 14.02.2020.
- [27] O. Kleineberg and S. Kehrer. TSN (Time-Sensitive Networking) - IEEE 802 Ethernet wird echtzeitfähig. https://www.sercos.de/fileadmin/documents/sercosnews_1-16_TSN_Artikel_DE_Highres.pdf Abgerufen am 10.02.2020.
- [28] H. Kopetz, A. Ademaj, P. Grillinger, and K. Steinhammer. The time-triggered Ethernet (TTE) design. In *Eighth IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC'05)*, pages 22–33, May 2005.
- [29] S. Kuhrt. Ein Time-Triggered Ethernet basiertes Rückfahrkamerasystem vom Entwurf bis zur Integration in einen Fahrzeugdemonstrator, 2013. Bachelor Thesis - Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg.
- [30] I. Land and J. Elliott. Architecting ARINC 664, Part 7 (AFDX) Solutions. XLINX, May 2009. Application Note: Virtex-4 and Virtex-5 FPGAS.
- [31] H. Lee, J. Lee, C. Park, and S. Park. Time-aware preemption to enhance the performance of audio/video bridging (avb) in ieee 802.1 tsn. In *2016 First IEEE International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI)*, pages 80–84, Oct 2016.
- [32] S. Luber and A. Donner. Was ist 802.3bp (1000Base-T1)? IP Insider, Dec. 2019. <https://www.ip-insider.de/was-ist-8023bp-1000base-t1-a-890211/> Abgerufen am 20.02.2020.

- [33] D. Maxim and Y.-Q. Song. Delay Analysis of AVB traffic in Time-Sensitive Networks (TSN). LORIA - University of Lorraine Nancy, France, Oct. 2017. https://members.loria.fr/DMaxim/wp-content/blogs.dir/156/files/sites/156/2017/12/TSN_AVB_Analysis_final.pdf Abgerufen am 30.03.2020.
- [34] J. L. Messenger. Time-Sensitive Networking: An Introduction. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2(2):29–33, JUNE 2018.
- [35] M. Murer. Business Development Manager - EKF Elektronik GmbH, Mar. 2020. Email Korrespondenz am 10.03.2020.
- [36] N. Navet. A journey into time-triggered communication protocols with a focus on Ethernet TSN. *Open Repository and Bibliography - Universite Du Luxembourg*, 2018.
- [37] R. Oishi. Deterministic Ethernet for Avionics - The need for lower weight, higher capacity and more open networking has driven the development of full-duplex, deterministic Ethernet for avionics. *Avionics Magazine*, Oct. 2008.
- [38] B. Pickles. Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX). SBS Technologies - Whitepaper, May 2006.
- [39] V. Plenk. *Angewandte Netzwerktechnik kompakt*. Springer Vieweg Verlag, 2017.
- [40] J. Rech. *Ethernet: Technologien und Protokolle für die Computervernetzung*. Heise Zeitschriften Verlag GmbH, 2014.
- [41] M. Schmidt. Ein AVB-Stack für Mikrocontroller basierte automotive Anwendungen, 2018. Bachelor Thesis - Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg.
- [42] W. Schulte. *TSN Time-Sensitive Networking*. VDE Verlag GmbH Berlin, 2020.
- [43] A. Springorum. Integration eines Kabinenmanagementsystems in ein Kabinen-Mockup. Master's thesis, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2012.
- [44] T. Steinbach. Echtzeit-Ethernet für Anwendungen im Automobil: Metriken und deren simulationsbasierte Evaluierung am Beispiel von TTEthernet. Master's thesis, HAW Hamburg, Berliner Tor 5, 20099 Hamburg, 2011.

- [45] T. Steinbach, H. Lim, F. Korf, T. C. Schmidt, D. Herrscher, and A. Wolisz. Tomorrow's In-Car Interconnect? A Competitive Evaluation of IEEE 802.1 AVB and Time-Triggered Ethernet (AS6802). In *2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Sep. 2012.
- [46] W. Steiner. An Introduction to TTEthernet. TU Vienna, Apr. 2013. Guest Lecture in Deterministic Networking.
- [47] W. Steiner and G. Bauer. TTEthernet: Timer-Triggered Services for Ethernet Networks. *28th IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, Oct. 2009.
- [48] R. Tillmanns and K. Rinortner. Warum Single Pair Ethernet für die Automation so interessant ist. *Elektronik Praxis Vogel*, Dec. 2018. <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/warum-single-pair-ethernet-fuer-die-automation-so-interessant-ist-a-784276/> Abgerufen am 15.02.2020.
- [49] W. Weber. Abrüstung beim Kabelsalat. *Design & Elektronik 12/2019 - EKF Elektronik GmbH*, Dec. 2019. https://www.ekf.de/applications/pressrelease/2019_12_de_single_pair_ethernet.pdf Abgerufen am: 01.03.2020.
- [50] A. Weder. Time Sensitive Networking: An Introduction to TSN. Technical report, Fraunhofer IPMS, Maria-Reiche-Straße 2, 01109 Dresden, Germany, 2019.
- [51] M. Wiegmann and S.-O. Berkahn. Electronic Cabin Systems: Fault tolerant Systems and Network Domain Concept A380 Part 2. Vorlesungsmaterial Electronic Cabin Systems (Elektrische Kabinensysteme) - HAW Hamburg.
- [52] J. Wiesböck. Single Pair Ethernet: Industrie-Norm IEC 63171-6 ab sofort frei verfügbar. *Elektronikpraxis Vogel*, Feb. 2020. <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/single-pair-ethernet-industrie-norm-iec-63171-6-ab-sofort-frei-verfuegbar-a-904316/> Abgerufen am 20.02.2020.

Veröffentlichungshinweise

Thema:
Analyse von echtzeitfähigem Ethernet und Konzeption von Anwendungen in der Flugzeugkabine

Verfasser/in: Jochen Niklas Heitman
Matrikelnummer: 2285622
Studiengang: Mechatronik BA

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Mark Wiegmann
Zweitprüfer/in: Prof. Dr. rer. nat. Thomas Lehmann

Dateiname auf der CDROM: BA_JochenNiklasHeitmann_2285622.pdf
Dateigröße in MB : 7,71MB

Einwilligung zur elektronischen Veröffentlichung:
*Ich/Wir **stimme/n zu**, dass meine/unsere Abschlussarbeit durch die Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg im Internet veröffentlicht wird. Meine/Unsere Urheberrechte als Autor bleiben von dieser Einwilligung unberührt.*

Hamburg, den 22.05.2020 _____
Unterschrift/en

Fakultät Technik und Informatik
Fakultätsservicebüro Faculty of Engineering and Computer Science
Faculty Service Office

1. Füllen Sie das Formular am Computer aus.
2. Drucken Sie das Formular 3 Mal aus
3. Unterschreiben Sie alle 3 Formulare
4. Schneiden Sie bei einem Exemplar den Rahmen aus und benutzen dies als Cover für Ihre CD (Abschlussarbeit im PDF Format)
5. Geben Sie die anderen 2 Exemplare zusammen mit Ihrer Abschlussarbeit ab
6. Die Unterschriften der Prüfer müssen nicht von Ihnen eingeholt werden

Bitte beschriften Sie auch Ihre CDROM entsprechend!

▼ Zur elektronischen Veröffentlichung geeignet: ja nein

_____. Datum . 20 ____
Erstprüfer/in

_____. Datum . 20 ____
Zweitprüfer/in

▼ Weiterleitung des Datenträgers mit Begleitblatt an die Bibliothek:

Datum ____ . ____ . 20 ____

Unterschrift Fakultätsservicebüro

▼ OPUS_ID: _____

Bitte zwei Kopien dieser Veröffentlichungshinweise mit der Abschlussarbeit einreichen!

Veröffentlichungshinweise

Thema:
Analyse von echtzeitfähigem Ethernet und Konzeption von Anwendungen in der Flugzeugkabine

Verfasser/in: Jochen Niklas Heitman
Matrikelnummer: 2285622
Studiengang: Mechatronik BA

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Mark Wiegmann
Zweitprüfer/in: Prof. Dr. rer. nat. Thomas Lehmann

Dateiname auf der CDROM: BA_JochenNiklasHeitmann_2285622.pdf
Dateigröße in MB: 7,71MB

Verweigerung zur elektronischen Veröffentlichung:
Ich/Wir verweigern die Veröffentlichung meine/unsere Abschlussarbeit durch die Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg im Internet.

Hamburg, den 22.05.2020
_____ Unterschrift/en

Fakultät Technik und Informatik
Fakultätsservicebüro Faculty of Engineering and Computer Science
Faculty Service Office

1. Füllen Sie das Formular am Computer aus.
2. Drucken Sie das Formular 3 Mal aus
3. Unterschreiben Sie alle 3 Formulare
4. Schneiden Sie bei einem Exemplar den Rahmen aus und benutzen dies als Cover für Ihre CD (Abschlussarbeit im PDF Format)
5. Geben Sie die anderen 2 Exemplare zusammen mit Ihrer Abschlussarbeit ab
6. Die Unterschriften der Prüfer müssen nicht von Ihnen eingeholt werden

Bitte beschriften Sie auch Ihre CDROM entsprechend!

Die Abschlussarbeit mit dem oben angegebenen Titel darf **nicht** durch die Hochschule für Angewandte Wissenschaften veröffentlicht werden.

Begründung der Verweigerung:

▼ Kenntnis von der Verweigerung der Veröffentlichung der oben angegebenen Arbeit

_____ . ____ . 20 ____
 Erstprüfer/in Datum

_____ . ____ . 20 ____
 Zweitprüfer/in Datum

Bitte zwei Kopien dieser Veröffentlichungshinweise mit der Abschlussarbeit einreichen!



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Heitmann

Vorname: Jochen Niklas

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Analyse von echtzeitfähigem Ethernet und Konzeption von Anwendungen in der Flugzeugkabine

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Ort

Datum

Unterschrift im Original