

# Lufthansa Technik AG

Schlussbericht FKZ 20K1708C:

„Multifunktionales Leichtbaudesign für variabel konfigurierbare  
Monumente“ (MICHEL)

Ein Forschungsvorhaben im Rahmen des 5. nationalen zivilen Luftfahrtforschungsprogramms

Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2018 - 30.06.2021



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## Inhalt

I.	Kurzdarstellung .....	4
I.1	Aufgabenstellung .....	4
I.2	Motivation .....	6
I.3	Projektgliederung & Verbundpartner .....	6
I.4	Arbeitspakete der Lufthansa Technik AG .....	8
II.	Eingehende Darstellung .....	10
II.1	Zielsetzung und erzielte Ergebnisse .....	10
II.1.1	Bearbeitung der Arbeitspakete .....	10
II.1.2	Konzeptvorstellung: Predictive Health Maintenance von LRUs .....	18
II.1.3	Ermittlung der Randbedingungen .....	20
II.1.4	Komponentenauswahl und -entwicklung .....	25
II.1.5	Umsetzung eines Konzeptdemonstrators .....	34
II.1.6	Ergebnisse und Ausblick .....	37
II.2	Erläuterung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	37
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	38
II.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses .....	38
II.5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	38
II.6	Veröffentlichungen und Vorträge .....	39

## Abkürzungen

A	Ampere
ADC	Analog Digital Converter
ARINC	Aeronautical Radio, Inc.
AP	Arbeitspaket
B	Byte
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CBOR	Concise Binary Object Representation
CoAP	Constrained Application Protocol
CSMIM	Cabin Secure Media-Independent Messaging
CSS	Cabin Systems Subcommittee
DCM	Diehl Comfort Modules
DTLS	Datagram Transport Layer Security
EMI	Electromagnetic Interference
f	Frequenz
HAP	Hauptarbeitspaket
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hz	Hertz
I	Elektrischer Strom
IATA	International Air Transport Association
IP	Internet Protocol
JSON	JavaScript Object Notation
LHT	Lufthansa Technik AG
LRU	Line Replaceable Unit
LZV	Lempel-Ziv-Welch (algorithm)
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MRO	Maintenance, Repair and Overhaul (Wartung, Reparatur und Überholung)
PHM	Predictive Health Maintenance
RFC	Request For Comment

STM32	STMicroelectronics 32 bit Microcontroller
TCP	Transport Control Protocol
TLS	Transport Layer Security
TUHH	Technische Universität Hamburg
UA	Unterauftrag
UDP	User Datagram Protocol
WAIC	Wireless Avionics Intra-Communications
XML	Extensible Markup Language
ZAL	Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung

## I. Kurzdarstellung

Der vorliegende Abschlussbericht umfasst die verschiedenen Aspekte des Verbundvorhabens MICHEL von Seiten der Lufthansa Technik AG (LHT). Zunächst erfolgt im Rahmen der Kurzdarstellung eine kompakte Einordnung und grobe Zusammenfassung des Projekts. Für eine detailliertere Beschreibung der Herangehensweise, gewonnenen Erkenntnisse und erfolgten Entwicklungsschritte ist das zweite Kapitel heranzuziehen.

### I.1 Aufgabenstellung

Die Kabine ist der Teil des Flugzeugs, der oft den prägendsten Einfluss auf das Flugerlebnis der Passagiere ausübt. Daher wollen Fluglinien sich durch ein passagierorientiertes Kabinendesign, angemessenen Komfort und optimalen Service von Wettbewerbern abheben. Gleichzeitig sind Raum und Kosten stark begrenzende Faktoren für die Gestaltung der Kabine und das Serviceangebot.

Eine der Herausforderungen für Fluggesellschaften besteht darin, Lösungen für das Angebot neuer Serviceleistungen zu finden, die selbstverständlich auch wirtschaftlich interessant sein sollen, sowie darin, die Kabinen an aktuelle Serviceansprüche und den gesellschaftlichen Wandel anzupassen. Hierzu ist es notwendig, den an Bord vorhandenen Raum intelligenter und flexibler zu nutzen, um zu verhindern, dass die Einführung neuer Serviceleistungen auf Kosten von Sitzplätzen geht.

Ein weiterer wichtiger Faktor, sowohl für die Wirtschaftlichkeit als auch für die Kundenzufriedenheit, ist die störungsfreie Funktion elektrischer Line Replaceable Units (LRU) wie z.B. Galley-Inserts, Lavatory-Komponenten und Business-Class-Sitzen. Deren Zustand wird zurzeit nicht während der Operation überwacht. Ihr Ausfall kann jedoch zu deutlichen Komforteinschränkungen und sogar Flugausfällen führen, weshalb eine kontinuierliche Überwachung sinnvoll erscheint.

Hiermit wird ein Schwerpunkt des zweiten Aufrufs im Rahmen des fünften Luftfahrtforschungsprogramms unterstützt, nämlich innovative Wartungs- und Instandsetzungsprozesse für den gesamten Produktlebenszyklus von Luftfahrtsystemen zu schaffen, d.h. Unterstützung des Paradigmenwechsels von festen zu bedarfsorientierten Wartungsaktivitäten.

Im Rahmen des Vorhabens MICHEL wurden die oben genannten Aspekte betrachtet und Lösungsvorschläge erarbeitet. MICHEL war ein Verbundvorhaben der Firmen Diehl und Lufthansa Technik sowie der Technischen Universität Hamburg (TUHH) und der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW).

Es wurde im fünften Luftfahrtforschungsprogramm (LuFo) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz ( BMWK) gefördert. Das Vorhaben in der Programmlinie Technologie zielte im Wesentlichen auf das förderpolitische Hauptziel „Leistungsfähige und effiziente Luftfahrt“.

## I.2 Motivation

Die Kabine hat eine deutlich geringere Lebensdauer als Flugzeuge, die oft 25 Jahre oder länger in Betrieb sind. Wartungen und Nachrüstungsarbeiten in Kabinen stehen auf Grund von Abnutzung oder nicht mehr zeitgemäßer Ausstattung regelmäßig an. Zusätzlich wird eine Kabine im Schnitt alle 7 Jahre vollumfänglich rekonfiguriert. Der Retrofit (die Überholung und Modifikation der gesamten Kabineneinrichtung) ist eines der wichtigsten Geschäftsfelder der Lufthansa Technik, da Flugzeughersteller die Kabinen ausschließlich für den Line-fit, also für den Ersteinbau, optimieren.

Die Kabine ist auch ein wichtiger Teil der Markenrepräsentanz einer Fluglinie. Fluglinien erwarten ein zunehmend hohes Maß an Individualisierung der Kabineneinrichtung, die an die individuellen Bedürfnisse der Fluglinie und den speziellen Einsatz angepasst ist. Gleichzeitig kommt es immer häufiger vor, dass Flugzeuge von einer Fluglinie zu einer anderen wechseln oder aber von Fluglinien geleast werden. Um das Flugzeug an die neue Fluglinie anzupassen, sind häufig sogenannte „Rebrandings“ erforderlich, die nicht nur die Lackierung des Flugzeugs, sondern auch dessen Innengestaltung betreffen.

Ein damit einhergehendes zentrales Problem, für das im Projekt neue innovative Lösungen gefunden werden sollten, sind die hohen Kosten und der hohe Zeitaufwand von diesen Wartungs- und Umrüstungsaktivitäten oder dem „Rebranding“.

Mit der Vision, durch neuartige Nutzungskonzepte und Wartungsmethoden die Profitabilität des Passagierluftverkehrs zu steigern und die Akzeptanz der Kabinengestaltung für die Passagiere zu erhöhen, startete das Vorhaben im Jahr 2018.

## I.3 Projektgliederung & Verbundpartner

Das Verbundvorhaben MICHEL zur Entwicklung neuer Designlösungen für Kabinenmonumente gliederte sich in drei Hauptarbeitspakete (HAP):

- HAP1: Neue Leichtbauweise
- HAP2: Funktionen und Integration
- HAP3: Vernetzte Engineering und Fertigungsprozesse

Diese wurden wiederum jeweils in weitere Arbeitspakete (AP) unterteilt, wobei sich die Verbundpartner den unterschiedlichen Arbeitspaketen zuordneten und verschiedene Rollen einnahmen. Ein Überblick der erfolgten Gliederung und Zuordnung kann Abbildung 1 entnommen werden.

Die Rollen der Verbundpartner unterschieden sich je nach Arbeitspaket. So hat Diehl federführend das HAP1 und die TUHH das HAP3 bearbeitet. Die Arbeitspakete des HAP2 wurden verstärkt auf alle Parteien verteilt. Zusätzlich war die Airbus Operations GmbH als assoziierter Partner an MICHEL beteiligt.

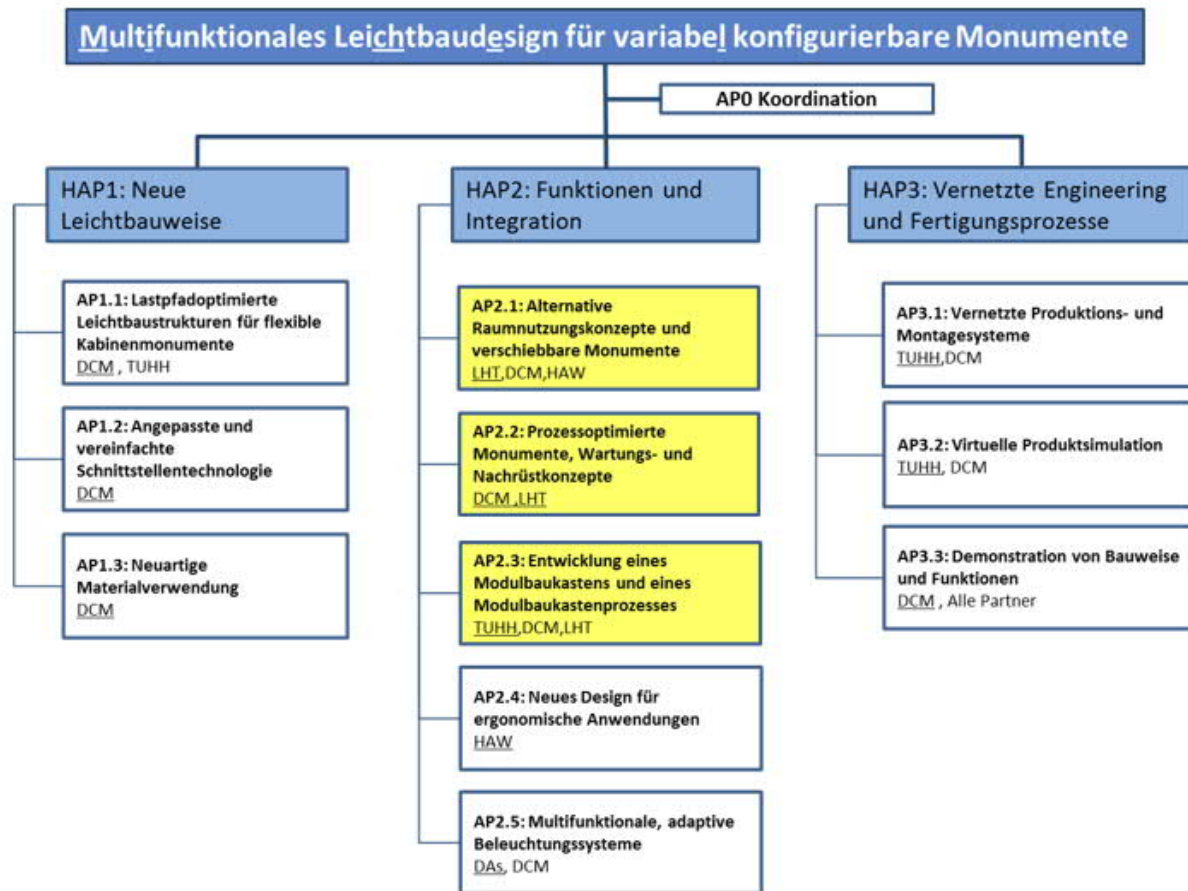


Abbildung 1: Projektstrukturplan MICHEL

Die LHT war im MICHEL-Verbund an den folgenden und in Abbildung 1 gelb hervorgehobenen Arbeitspaketen beteiligt:

- AP2.1: Alternative Raumnutzungskonzepte und verschiebbare Monumente
- AP2.2: Prozessoptimierte Monumente, Wartungs- und Nachrüstkonzepte
- AP2.3: Entwicklung eines Modulbaukastens und eines Modulbaukastenprozesses

Gemäß der Antragsformulierung bestand der Anteil der LHT im Verbundprojekt MICHEL zum großen Teil aus beratender und moderierender Tätigkeit. Der Verbundführer Diehl hat in der Vergangenheit große Kompetenz auf dem Gebiet des Galley-, Lavatory- und generell des Monumentenbaus aufbauen können. Die Konstruktion und der Bau der Monumente erfolgte dabei stets auf Grundlage einer Spezifikation, die vom Kunden erstellt wurde. Bei Diehl entstand der Wunsch, selbst zukunftsweisende Monumente zu entwickeln, die sich von den Standard-Modulen durch neue Konzepte unterscheiden sollten. Da hierzu Wissen über die Abläufe in der Kabine eines Verkehrsflugzeugs sowie die Operation im Allgemeinen notwendig ist, fiel der LHT im MICHEL-Verbund vor allem die Rolle des Vermittlers von Hintergrundinformationen, des



Organisators von Seminaren und Workshops sowie generell des Luftfahrt-Partners zu, der sowohl die Kompetenz des Luftfahrtunternehmens als auch die des zulassenden luftfahrttechnischen Betriebs einbringen kann.

Infolge der Zuordnung der Verbundpartner auf die unterschiedlichen Arbeitspakete werden in diesem Bericht lediglich die drei genannten Arbeitspakete mit LHT Beteiligung betrachtet. Auf die Arbeiten und Ergebnisse der Partner soll und kann in diesem Bericht nicht detaillierter eingegangen werden. Vielmehr wird stattdessen explizit auf die ausführlichen Abschlussberichte der Konsortialpartner verwiesen.

## I.4 Arbeitspakete der Lufthansa Technik AG

Zur abschließenden finalen Einordnung der LHT-Tätigkeiten im Rahmen des MICHEL-Projekts soll etwas näher auf die drei zugewiesenen Arbeitspakete eingegangen werden. Technologisch und wissenschaftlich knüpften diese im Wesentlichen an drei Handlungsfelder an, die im Folgenden kurz dargestellt werden. Der Weg zu den jeweiligen aufgeführten gewonnenen Erkenntnissen wird im folgenden Kapitel näher beleuchtet.

### Monumente und Raumnutzungskonzepte (in Anlehnung AP2.1)

Es bestehen bereits einige Konzepte im Luftfahrtbereich, um einzelne Module flexibler zu gestalten, die zumeist auch Retrofit-tauglich sind. Beispielhaft kann das Galley-Bar Konzept angeführt werden, bei der im Flugbetrieb nach Ende des Kabinenservice eine Bar im Galley Bereich den Gästen zur Verfügung steht. Für den Kabinenservice wird durch das Verschieben des Bar-Monumentes die Arbeitsfläche im Galley-Bereich vergrößert und der Arbeitskomfort der Kabinencrew erhöht. Die bisher bestehenden Konzepte bieten jedoch nur modulare Lösungen für spezifische Teilbereiche an und betrachten nicht das gesamte System „Kabine“. Ein Grund für die eher geringe Modularität liegt in den starken Einschränkungen, die durch technische und materialeitige Rahmenbedingungen sowie Regularien vorliegen.

In den gemeinsamen Seminaren mit allen Verbundpartnern wurde im Rahmen der Projektstätigkeiten bald erkannt, dass die in AP2.1 genannten verschiebbaren Monumente in vielerlei Hinsicht wenig Aussicht auf Erfolg gehabt hätten. Abgesehen von den strukturellen Anforderungen an verschiebbare Monumente und den damit einhergehenden zulassungsrelevanten Herausforderungen erschien der organisatorische Aufwand hinsichtlich der Rüstzeit und des Personals, etwaiger Bevorratung von variablen Modulelementen sowie der jedes Mal notwendigen Prüfung einer baulichen Veränderung in einer Flugzeugkabine als für eine Airline inakzeptabel. Der Aspekt der verschiebbaren Monumente wurde deswegen nicht weiterverfolgt. Das Hauptaugenmerk dieses Arbeitspaketes wurde somit auf die Entwicklung von alternativen Raumnutzungskonzepten gelegt. Im Rahmen der durchgeführten Workshops konnten verschiedene Konzepte für ein sogenanntes Kombi-Monument aus Galley und Lavatory entwickelt

werden. Die anschließende Detailausarbeitung dieser Konzepte sollte durch den Verbundführer Diehl und ohne weitere Einbindung der LHT erfolgen.

### Nutzungs-, Wartungs- und Umrüstungsprozesse (in Anlehnung an AP2.2)

Die Wartung der Galleys und Lavatories eines Flugzeugs erfolgt nach Herstellerangaben. Während einer Transition (Umrüstung bei Wechsel des Eigentümers bzw. Leasingnehmers) oder eines Retrofits (z.B. Einbau neuer Modul-Generation in der Kabine) werden die zu tauschenden Module komplett entfernt. Galleys sind oft nicht hinreichend modular aufgebaut und werden insbesondere bei Transitions komplett getauscht. Die Wartungs- und Flottenumrüstungsprozesse sind bisher nur wenig automatisiert, weshalb Wartungen und Flottenumrüstungen langwierig und teuer sind. Der größte Kostenfaktor für die Fluglinie ist dabei die Bodenzeit des Flugzeugs.

Das Arbeitspaket AP2.2 bot mit dem Schwerpunkt „Prozessoptimierte Module, Wartungs- und Nachrüstungskonzepte“ die Möglichkeit, nicht nur das Modul, sondern auch die LRUs der Module in den Blick zu nehmen. Deren Wartung erfolgt „on condition“, also in der Regel nach Störung oder Ausfall einer LRU. Hier zeigte sich die Möglichkeit, ein technologisch anspruchsvolles Wartungskonzept zu entwickeln, das mittelfristig realistische Anwendungschancen verspricht. Das am Beispiel eines „Coffee Makers“ entwickelte Konzept soll potenziell die Möglichkeit bieten, den sich anbahnenden Ausfall einer LRU zu erkennen und entsprechende präventive Wartungsmaßnahmen einzuleiten.

### Modulbaukasten (in Anlehnung an AP2.3)

Mit dem Modulbaukastenprozess zur schnellen Rekonfiguration wird das Ziel verfolgt, die neuen Konzepte und Prozesse in modulare Strukturen und Ansätze zu übersetzen. Hierbei wird ein modularer Baukasten abgeleitet, der aktuelle regulatorische und flugzeugspezifische Anforderungen und derzeitige Retrofitprozesse berücksichtigt.

Das Arbeitspaket 2.3 befasste sich mit der Erstellung eines Modulbaukastens. Die Grundlagen dieses Pakets wurden von den Verbundpartnern gemeinsam erarbeitet. Der Modulbaukasten ist anschließend vom Verbundpartner TUHH und ohne weitere Einbindung der LHT entwickelt worden.

## II. Eingehende Darstellung

### II.1 Zielsetzung und erzielte Ergebnisse

Nach der vorangegangenen Einführung in die Projektstruktur und die bereits teilweise angedeuteten Ergebnisse soll in diesem Abschnitt eine nähere Betrachtung der während des Projektes erfolgten Arbeits- und Entwicklungsschritte von Seiten der LHT stattfinden. Abschließend wird zudem ein Ausblick auf weitere Ansatzpunkte gegeben, die zur weiteren Verfolgung im Anschluss des abgeschlossenen Projektes MICHEL empfohlen werden und anzustreben sind.

#### II.1.1 Bearbeitung der Arbeitspakete

Die Lufthansa Technik hat die Arbeitspakete AP2.1 – AP2.3 zusammen mit den anderen Projektpartnern bearbeitet. Der Beitrag bestand dabei primär in der Bereitstellung von Expertenwissen zu Prozess-Themen wie beispielsweise dem Crew-Einsatz in der Galley und beim Bordservice, der Versorgung der Galley mit Catering-Gütern und der Wartung von LRUs und deren Bereitstellung. Auf regelmäßigen Arbeitstreffen wurden die erzielten Ergebnisse unter den Projektpartnern ausgetauscht und weitere Schritte und Themen abgestimmt. Außerdem wurden Workshops zu dedizierten Fragestellungen mit Beteiligung der jeweiligen Lufthansa-Fachbereiche organisiert. Diese dienten unter anderem der Identifikation möglicher Lösungsansätze. Eine einführende, zeitlich chronologische Übersicht kann zunächst Tabelle 1 entnommen werden. Anschließend werden die einzelnen Workshops und Erkenntnisse noch einmal individuell vorgestellt.

Tabelle 1: Übersicht der durchgeführten Workshops und ihrer Zielsetzungen

Workshop	Zielsetzung
Workshop "Predictive Health Maintenance bei Triebwerken" LHT-Wartungsingenieure (Engines) Hamburg, ZAL, 11.03.2019	Vorstellung der Betriebsdatenerfassung bei Flugzeugtriebwerken sowie des Funkstandards "WAIC", der für die Datenübertragung im Flugzeug entwickelt wurde: Was kann für die LRU-Überwachung in der Kabine übernommen werden?
"Galley-Workshop" Kabinen-Crewmitglieder Frankfurt, DLH, 15.03.2019	Austausch mit Kabinenpersonal zum Thema Kabinenlayout und Bordservice: Anforderungen und Kritik des Kabinenpersonals bzgl. Kabinenmonumente.
"Shape Session" LHT-Seminarleiter und Assistenten Hamburg, LHT-Basis, 15.04.2019	Workshop zum Thema "Shape your Business Model Idea": systematische Entwicklung von Produktideen im Bereich Flugzeugkabinen-Monumente

<p>Workshop "Coffee Maker" LHT-Wartungsingenieure Hamburg, LHT-Basis, 05.09.2019</p>	<p>Wartungsprogramm und Ausfallwahrscheinlichkeit einer LRU am Beispiel eines Coffee Makers: Wie ist die Wartung und Bereitstellung von LRUs bei LHT organisiert.</p>
<p>"MICHEL-HAP2-Workshop" LHT-Galley-Experte Hamburg, ZAL, 24.10.2019</p>	<p>"Rapid Prototyping" von Galley-Monumenten: aufgrund von zunächst gesammelten Anforderungen werden Galley-Monumente entworfen und ein Modell erstellt.</p>
<p>"Catering-Hospitation" Manager und Mitarbeiter Fa. CATS, Flughafen HAM, 12.03.2020</p>	<p>Hospitation bei einem Airline-Caterer: Analyse der Lieferkette, von der Bevorratung bis zur Anlieferung ins Flugzeug, Einfluss der Galley-Monumente auf die Abläufe.</p>

### Workshop "Predictive Health Maintenance bei Triebwerken"

Der Workshop "Predictive Health Maintenance bei Triebwerken" wurde von LHT aufgrund des allgemeinen Wunsches durchgeführt, Wartungskonzepte kennenzulernen, welche proaktiv anstatt reaktiv konzipiert sind (Protokoll s. Abbildung 2). Es zeigte sich, dass die hierfür notwendige Sensorik für Monumente zu aufwendig und zu kostspielig sein würde. Für LRUs hingegen sah man eine Anwendungsmöglichkeit. Hierbei erschien das im Rahmen dieses Workshops vorgestellte „WAIC“-Funkformat sinnvoll, um drahtlose Datenübertragung in der Flugzeugkabine zu betreiben: WAIC steht für „Wireless Avionic Intra-Communication“ und beschreibt ein Frequenzband, das für die Flugzeug-internen drahtlosen Datenübertragungen zum Standard erhoben werden sollte. Ein Jahr später hat die IATA entgegen aller Erwartungen diese Standardisierung abgelehnt, sodass für die Anwendung wieder auf den auch in Flugzeugen genutzten WiFi-Standard zurückgegriffen wurde.

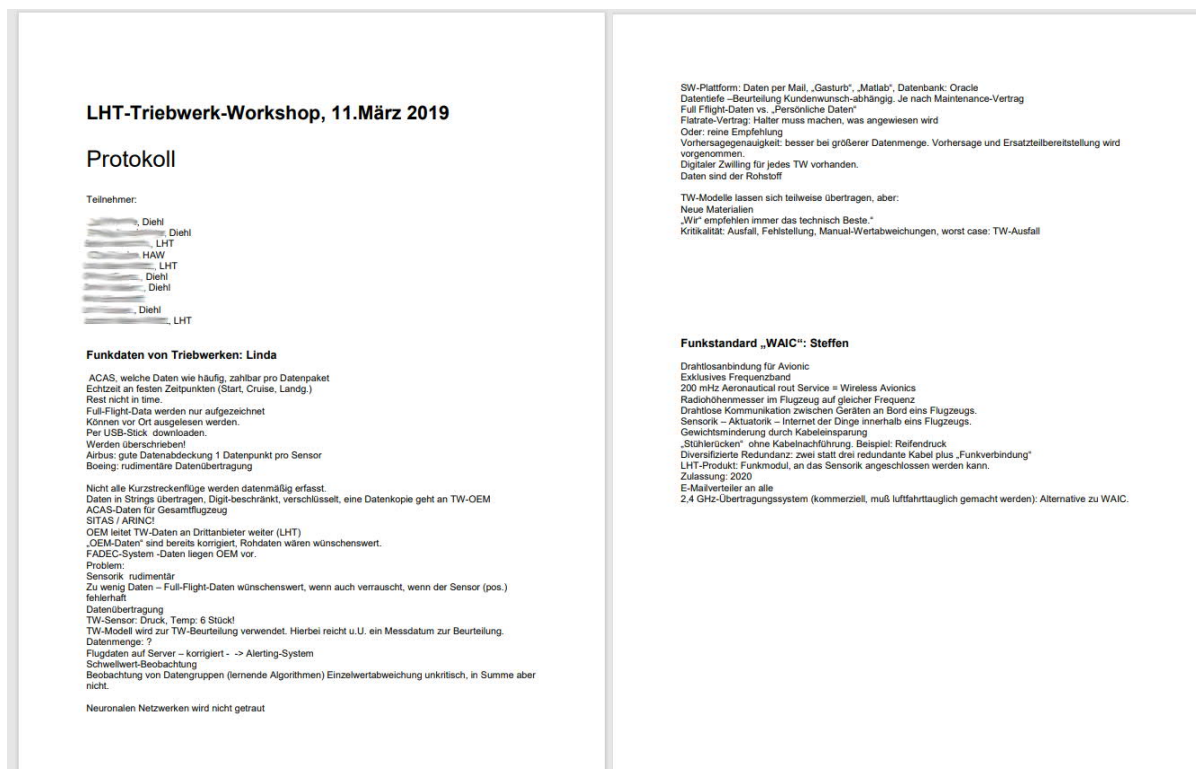


Abbildung 2: Protokoll Workshop „Predictive Health Maintenance bei Triebwerken“

## „Galley Workshop“

Der „Galley Workshop“ wurde zusammen mit Cabincrew-Mitgliedern durchgeführt und diente unter anderem der direkten Einbringung von Anforderungen, entstehend aus dem operationellen Betrieb. Es konnte festgehalten werden, dass die Bestrebungen der Kabinenverdichtung und der damit einhergehenden Verkleinerung des Arbeitsplatzes eher ablehnend aufgenommen wurden (Protokoll s. Abbildung 3). Auch die Kombination von Galley und Lavatory wurde aus operationeller Sicht kritisch gesehen. Für zukünftige Monumente, das eigentliche Projektziel, würde dies eine Abkehr von der Tendenz zu weiterer Verdichtung der Monumente bedeuten. Eine Vergrößerung der Monumente steht jedoch im Widerspruch zu den wirtschaftlichen Zielen der Airlines.

Ferner wurde die geringe Zuverlässigkeit der Galley-Inserts wie z.B. Dampfföfen und Kaffeemaschinen bemängelt. In diesem Zusammenhang und in Kombination mit den Ergebnissen des vorherigen Workshops („Predictive Health Maintenance bei Triebwerken“) entstand erstmalig die Idee, im Rahmen des Forschungsprojekts das Augenmerk auch auf die Zuverlässigkeit der Galley-Inserts zu richten.

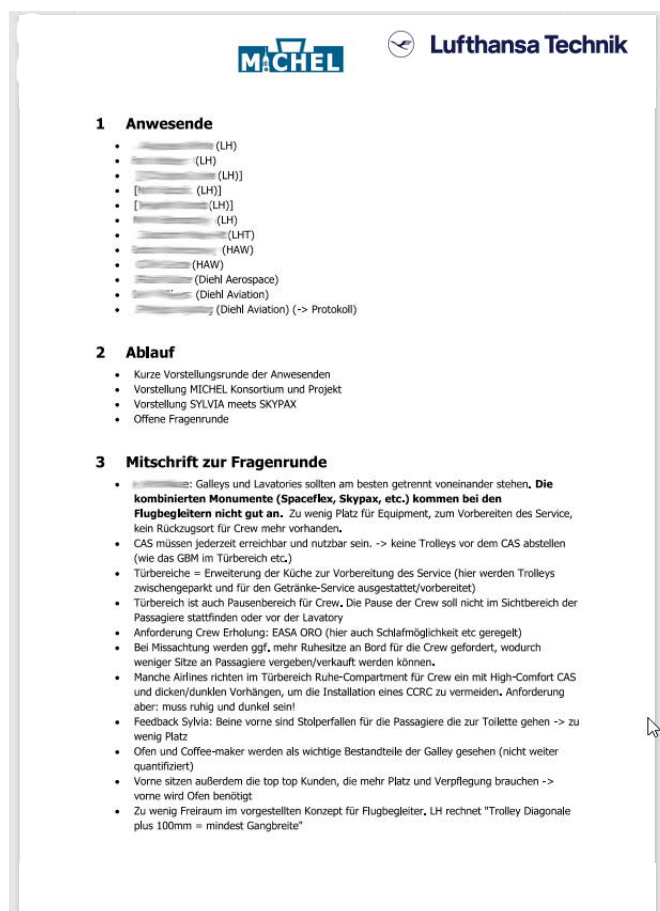


Abbildung 3: Auszug des Protokolls zum „Galley-Workshop“

## „Shape Session“

Im Rahmen des Workshops „Shape Session“, den das Projektteam bei LHT durchgeführt hat, wurden Methoden zur systematischen Entwicklung von Produkten vorgestellt und anhand zweier exemplarischer Produktideen angewendet (s. Abbildungen 4 und 5). Bei dieser Gelegenheit wurde von einer Gruppe des Teams die Entwicklung eines sogenannten Kombi-Monuments (Galley und Lavatory: „SkyPAX 2.0“), von der zweiten Gruppe das Thema „Schadenserkennung und Datenübertragung“ bearbeitet. Danach wurden diese zwei Ansätze in der Projektgruppe ausführlich diskutiert und entschieden, beide Ansätze in anschließenden Workshops weiterzuverfolgen.



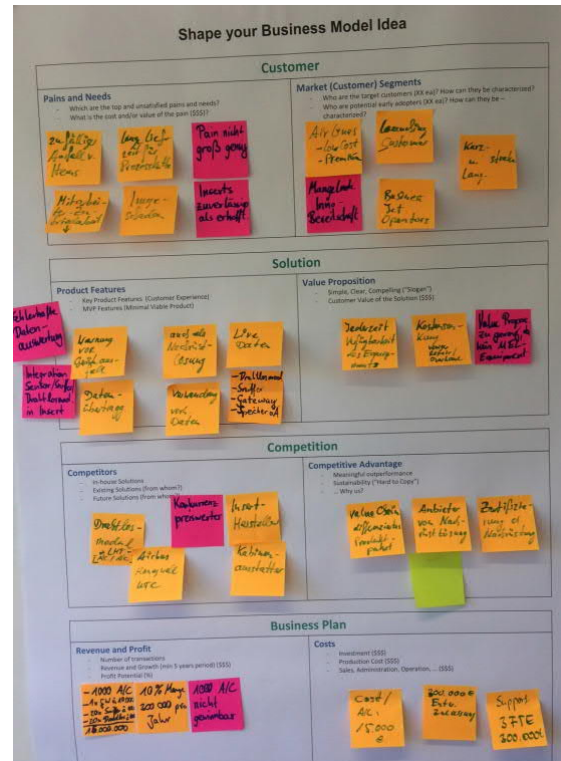
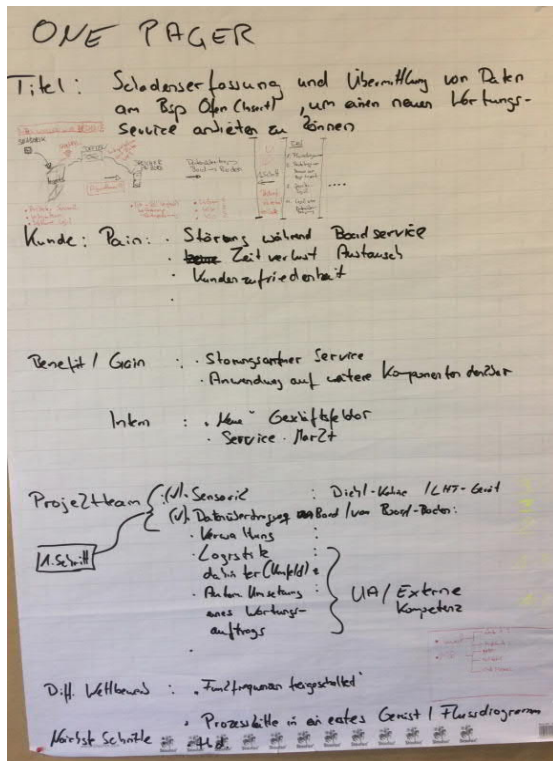


Abbildung 4: Shape Session – One Pager und Brainstorming Board „Schadenerfassung und Datenübermittlung“

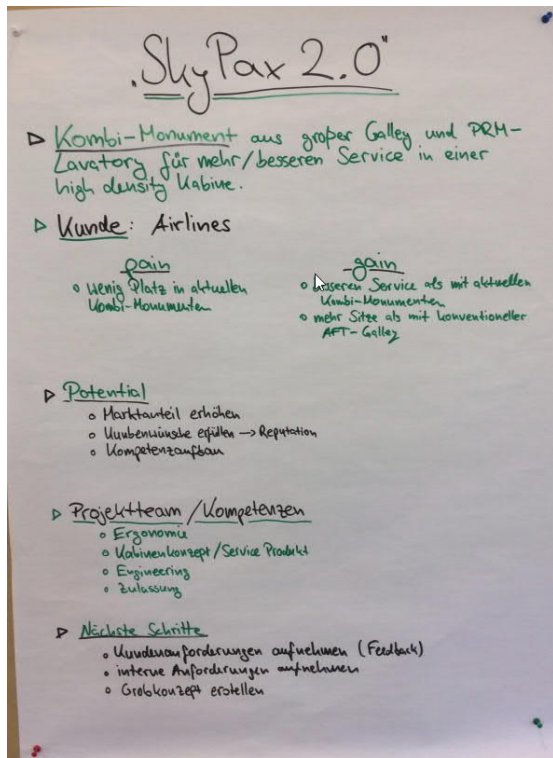


Abbildung 5: Shape Session – One Pager und Brainstorming Board „Kombi-Monument“

## Workshop „Coffee Maker“

In Hinblick auf den Themenschwerpunkt „Schadenserfassung und Datenübertragung“ hatte sich das Projektteam zu einem Workshop „Coffee Maker“ zusammengefunden, welcher gemeinsam mit LHT-Wartungsingenieuren durchgeführt wurde (Protokoll s. Abbildung 6). Hierbei sollten am exemplarischen Beispiel einer Flugzeug-Kaffeemaschine die Abläufe hinsichtlich Wartung, Reparatur und Bereitstellung dargestellt und mögliche Verbesserungen diskutiert werden. Dem Projektteam wurde bestätigt, dass der Ausfall von Galley-Inserts durchaus einen Einfluss auf die Flugdurchführung haben kann. Es wurde darauf hingewiesen, dass es bislang nicht möglich ist, die Funktion von Galley-Inserts oder anderen elektrischen Komponenten in der Flugzeugkabine, wie z.B. Business-Class-Sitzen, automatisch zu überwachen.

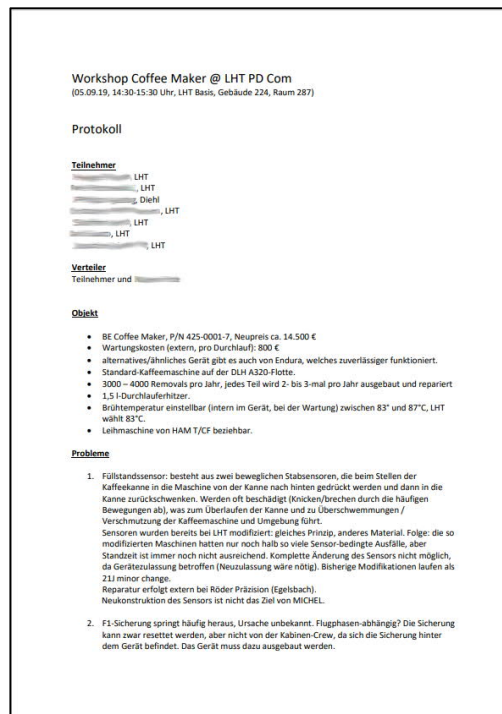


Abbildung 6: Protokoll Workshop „Coffee Maker“

## „MICHEL HAP2-Workshop“

Der zweite Themenschwerpunkt „SkyPax 2.0“, der im Rahmen des Workshops „Shape Session“ herausgearbeitet wurde, wurde im „MICHEL HAP2-Workshop“ vertieft. Unter Anleitung eines Galley-Experten von LHT wurden Monument-Varianten entwickelt und „Rapid Prototyping“-Modelle gefertigt, die anschließend der Gruppe vorgestellt wurden.

Es sind die vier Varianten „Short Range – low Cost“, „Short Range – Premium“ (Abbildung 7), sowie „Long Range – low Cost“ und „Long Range – Premium“ (Abbildung 8) entstanden. Diese Varianten wurden anschließend vom Projektführer Diehl zur detaillierteren Konzeptausarbeitung weiterverfolgt.





Abbildung 7: Protokoll-Auszug Workshop „HAP 2“ – Short Range / Long Range für Low Cost Carrier

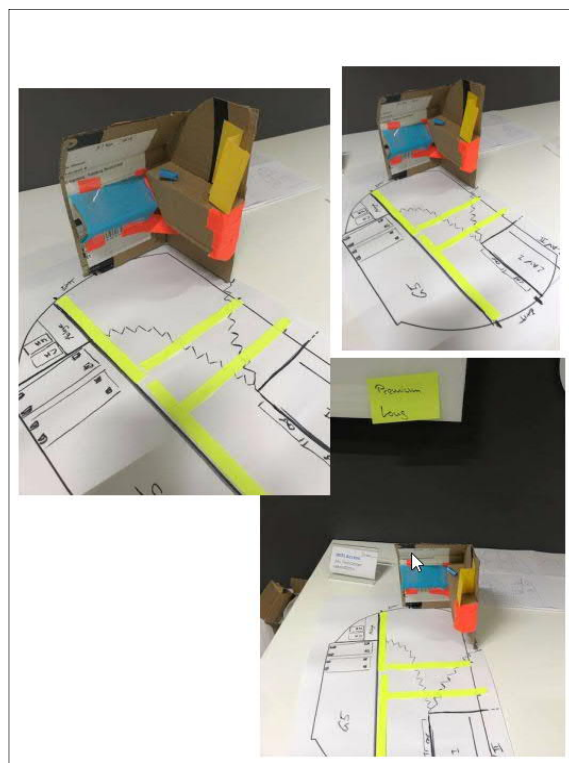
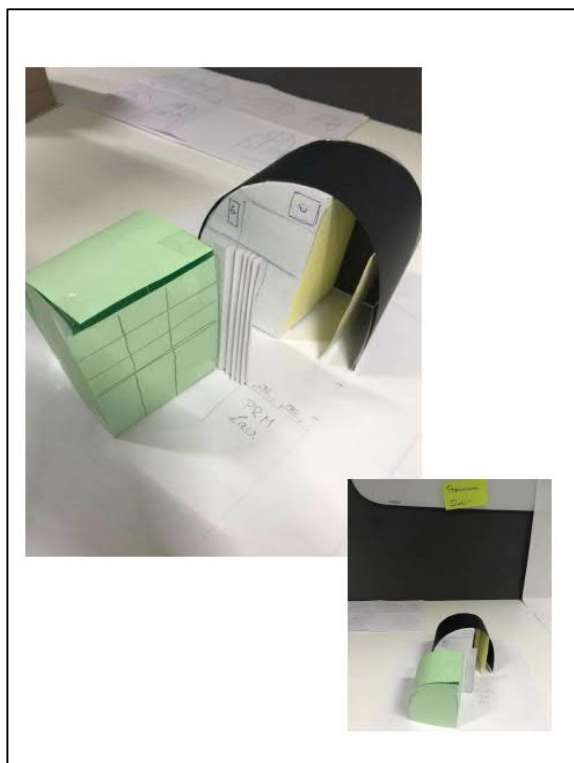


Abbildung 8: Protokoll-Auszug Workshop „HAP 2“ – Short Range / Long Range für Premium Carrier

## „Catering Hospitation“

Zu einer umfassenden Sicht auf Galley-Monumente gehört auch der Aspekt der Beladung. Zu diesem Zweck hat LHT eine Hospitation bei der Catering-Firma CATS organisiert. Das Projektteam hat während einer Nachtschicht den Catering-Prozess auf dem Flughafen Hamburg kennengelernt und dabei die Bereitstellung der Catering-Produkte, die Beladung der Trolleys und Galley-Container und deren Anlieferung ans Flugzeug begleitet. Von besonderem Interesse waren die ergonomischen Bedingungen, unter denen die Bestückung einer Galley durch die Mitarbeiter des Catering-Unternehmens vorgenommen werden.

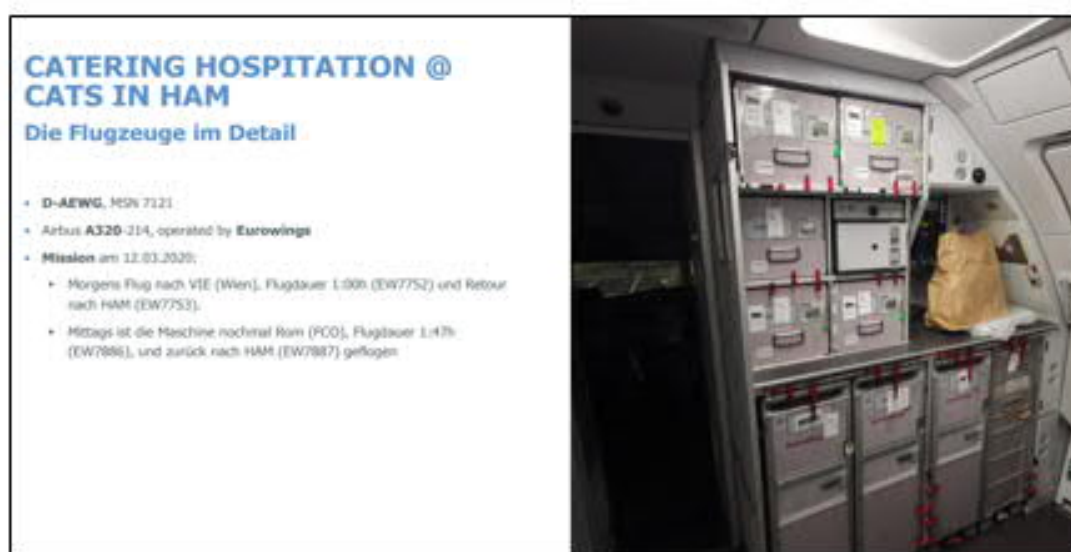


Abbildung 9: Protokoll-Auszug „Catering Hospitation“

## Zusammenfassung der Workshopergebnisse

Die Organisation und Durchführung der verschiedenen Seminare hat es ermöglicht, verschiedene differenzierte Betrachtungen auf die unterschiedlichen Arbeitspakete zu erhalten, an denen die LHT beteiligt war.

Beim AP2.1 musste die Grundidee der verschiebbaren Monumente aufgrund zu vieler Nachteile verworfen werden. Der Fokus wurde auf alternative Raumnutzungskonzepte gelegt, in dessen Rahmen das „SkyPax 2.0“ Konzept entstand und im weiteren Verlauf von Diehl ausgearbeitet werden sollte.

Das AP2.3 zur Erstellung eines Modulbaukastens konnte grundlegend durch die Verbundpartner gemeinsam erarbeitet werden, wurde anschließend jedoch von der TUHH weiter verfolgt.

Die LHT führte folglich lediglich im Rahmen des AP2.2 weitere Entwicklungsschritte durch, die der Umsetzung eines Konzeptes zur Zustandsüberwachung von LRUs dienen und im weiteren Verlauf vorgestellt werden sollen.

## II.1.2 Konzeptvorstellung: Predictive Health Maintenance von LRUs

Im Rahmen des AP2.2 hat die LHT am Beispiel „Predictive Health Maintenance“ (PHM) ein umfassendes Wartungskonzept erarbeitet, welches den gesamten Prozess von der Fehlerdetektion an einer LRU während des Fluges bis zur Beschaffung eines Ersatzgerätes und dessen Einbau umfasst. Die Betrachtung und Konzeptausarbeitung erfolgte aufbauend auf den durchgeführten Workshops am Beispiel einer Kaffeemaschine und wird im Folgenden näher vorgestellt.

Zur Beachtung der verschiedenen Aspekte des Wartungs- und Nachrüstkonzepts wurden mittels Erhebungen bei Cabin-Crew-Mitgliedern, Wartungstechnikern und Mitarbeitern des Wartungs-Engineerings diverse Anforderungen bestimmt, die eine störungsfreie Flugzeug-Operation ermöglichen sollen. Hierbei wurden Fail Reports von LRUs hinzugezogen, um Fehlerszenarien zu identifizieren. Die Betrachtung einer einzelnen LRU anstatt eines kompletten Monuments ergibt sich aus dem Umstand, dass Monumente weniger störanfällig als einzelne LRUs sind.

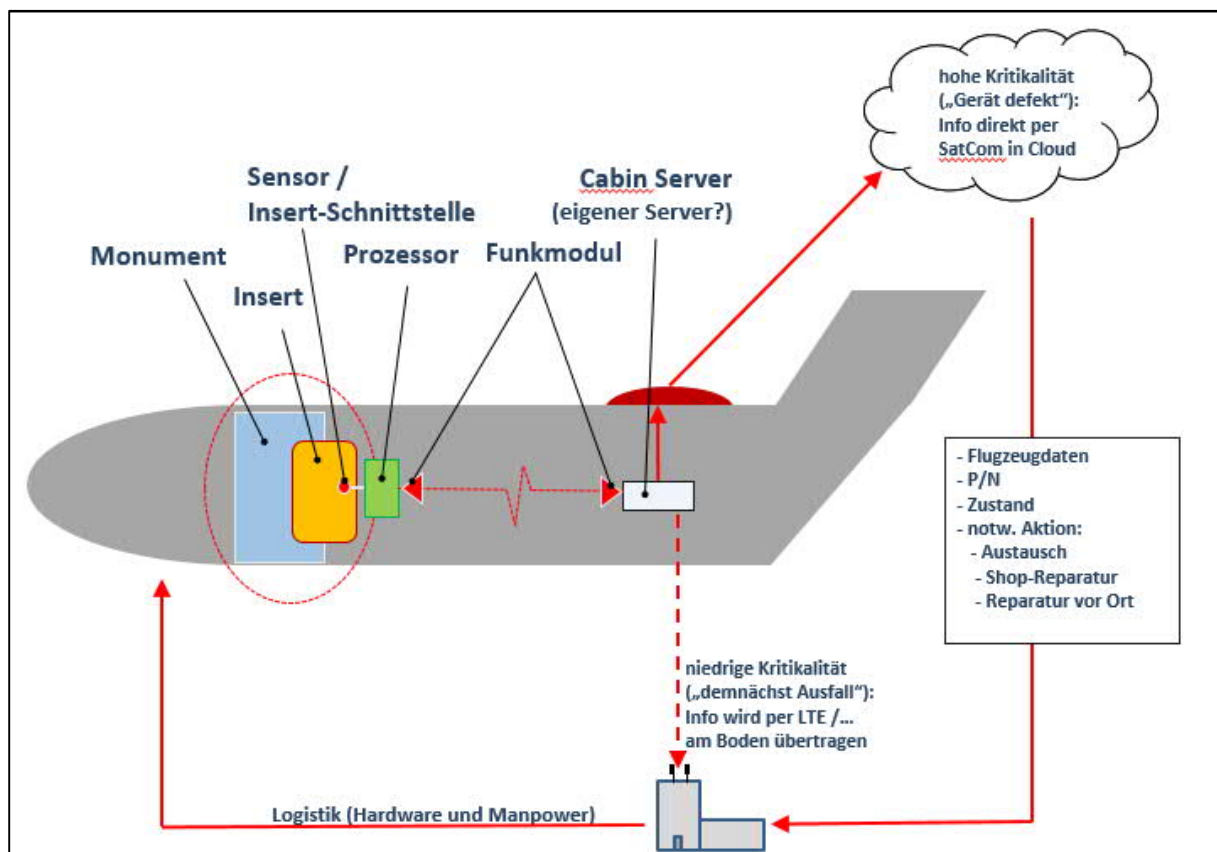


Abbildung 10: Prinzip und Prozessumgebung für PHM mittels des Mess-Sendemoduls

Das Funktionsprinzip sowie die zugehörige Prozessumgebung werden in Abbildung 10 aufgezeigt. Mit der erfolgreichen Umsetzung dieser Prozesse gilt es, verschiedene Ziele hinsichtlich der LRU-Überwachung zu erfüllen. So soll mit dem finalen Konzept:

- eine Trenderkennung des Funktionsstatus individueller LRUs erfolgen
- eine Bewertung der Trends durchgeführt werden
- schließlich eine Nachricht generiert und an eine Bodenstation übermittelt werden

Die Bewältigung dieser Ziele erfordert folglich die Betrachtung und Umsetzung mehrerer Teilprozesse, die durch das Mess-Sendemodul und im späteren Verlauf durch weitere Konzeptkomponenten zu erfüllen sind. Diese umfassen:

- die Entstehung des Messsignals
- die Zwischenspeicherung des Messsignals
- die Weiterleitung des Messsignals an Bord des Flugzeugs
- die Verarbeitung des Signals an Bord des Flugzeugs

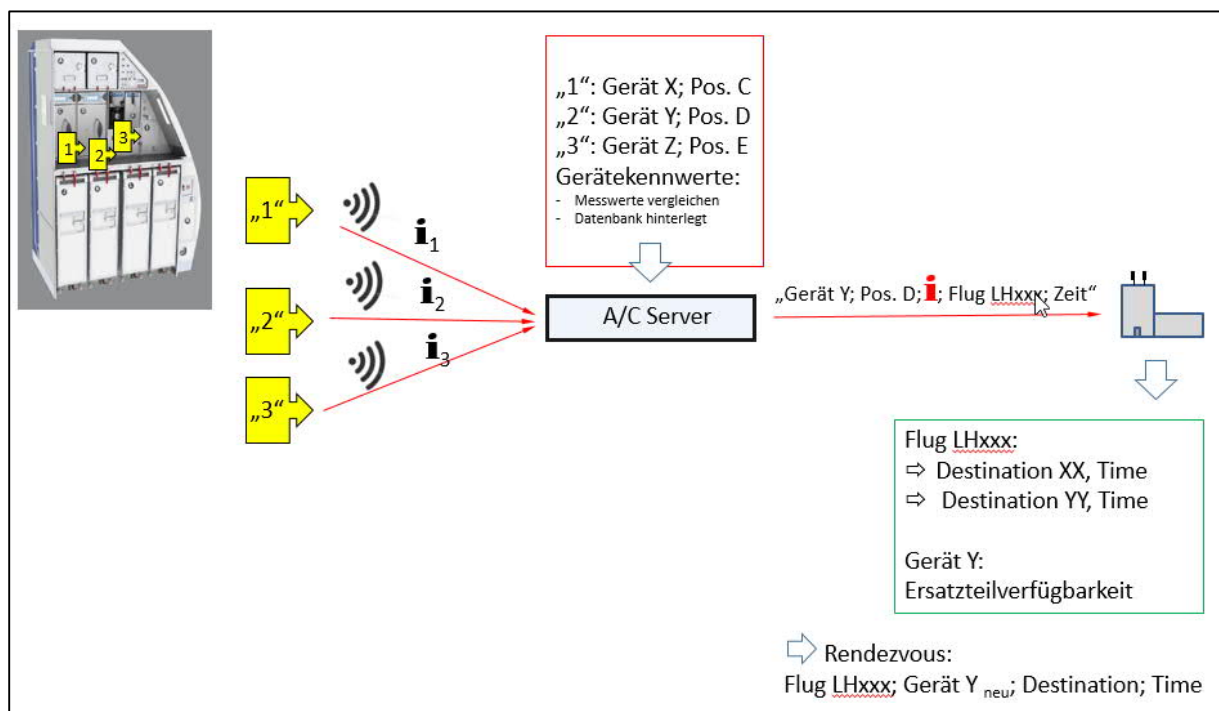


Abbildung 11: Signal- und Prozesskette von PHM

Die Konkretisierung des Konzepts kann Abbildung 11 entnommen werden. Das Schema zeigt das Beispiel einer Galley, bei der mehrere Galley-Inserts wie Dampföfen und Kaffeemaschinen mit Mess-Sende-Modulen bestückt werden. Zur korrekten Identifikation der einzelnen Inserts senden die Module eine individuelle Adresse an den Flugzeug-Server.

Im ersten Ansatz fiel die Entscheidung auf den Strom als charakteristische Messgröße. Es ist aber auch denkbar, zukünftig andere Größen wie Druck, Temperatur, Feuchtigkeit etc. zu messen.

Da die Anzahl der Module groß sein kann, wenn diese z.B. in den Passagiersitzen verbaut wurden, ist es notwendig, die übertragene Datenmenge zu reduzieren. Deshalb ist eine temporäre Datenspeicherung und -filterung im Modul vorgesehen. Das bedeutet, dass nicht jeder Messwert übertragen wird, sondern nur solche, die von einem definierten Standard abweichen. Wenn eine LRU einwandfrei funktioniert, muss das Mess-Sendemodul keine Daten übermitteln.

Um die generellen Funktionen „messen“ und „drahtloses Senden“ zu erproben, wurde zunächst ein Funktionsmodell erstellt. Dieses sollte als sogenannter Brettaufbau gestaltet werden, d.h. die elektronischen Komponenten sind mit Drähten und nicht mit Lötbahnen verbunden. Dieses Funktionsmodell wurde im Kabinen-Mock-up der LHT im ZAL getestet.

Parallel zu den Funktionstests mit dem Brettaufbau wurde die Gerätespezifikation des Funktionsmodells erweitert, um die Erkenntnisse aus der Erprobung einfließen zu lassen sowie um den luftfahrttechnischen Ansprüchen zu genügen.

### II.1.3 Ermittlung der Randbedingungen

Im Rahmen der anfänglichen Entwicklung des Mess-Sendemoduls wurden verschiedene Anforderungen definiert, die durch das Modul im Sinne einer robusten Funktionsweise erfüllt werden sollten:

- Hohe Auflösung bei großem Stromfluss
- Hohe Abtastrate
- Präzise, punktuelle Messungen in Echtzeit
- Datenanalyse und Datenspeicherung

Die im Folgenden dargestellten Auszüge aus dem Arbeitsprotokoll sollen die verschiedenen Ansätze aufzeigen, die zum Aufbau einer Strommessung entwickelt wurden. Das Protokoll entstand während der Design-Meetings, die gemeinsam mit Software- und Hardware-Ingenieuren durchgeführt wurden.

### II.1.3.1 Strommessung: Welcher Stromsensor ist für die Messung geeignet?

Nominell wurde als maximale Strombelastung  $I = 40 \text{ A}$  angegeben. Da dies nicht näher definiert festgehalten wurde (AC, DC, pp, p, rms), wurde für die folgenden Betrachtungen von dem Effektivwert ( $I_{\text{rms}}$ ) ausgegangen. Mit der Annahme eines sinusförmigen Stromverlaufs ergibt sich folgende maximale Strombelastung und somit der zu erwartende Messbereich des Stromsensors:

$$I_{\text{pp}} \rightarrow I_{\text{pp}} = 2^{0.5} * I_{\text{rms}} \rightarrow \text{Sensor mindestens } \pm 57 \text{ A} \rightarrow \pm 100 \text{ A}$$

Das bedeutet, es müsste ein Sensor mit einem Messbereich in der Größenordnung  $\pm 100 \text{ A}$  gewählt werden. Ein so hoher Messbereich geht mit einer geringen Auflösung einher. Eine Möglichkeit, die Auflösung zu verdoppeln, besteht darin, nur eine Hälfte des Stromverlaufs zu messen, vorausgesetzt, es handelt sich um einen symmetrischen Stromverlauf.

Die geforderte Auflösung der Strommessung von etwa  $5 \text{ mA}$  ist hierbei aber nicht zu erreichen. Um ein besseres Verständnis der Messgrößen zu erhalten, wurde abgeschätzt, welche Speicherbreite erforderlich ist, um die gewünschten Messwerte numerisch zu verarbeiten.

$$\text{Range } \pm 100 \text{ A} / 5 \text{ mA} = 40000 = 2^{16} \quad (\text{Id } 40000 = \log 40000 / \log 2 = 15.28) \rightarrow 16\text{-bit Variable}$$

$$\text{Range } \pm 57 \text{ A} / 5 \text{ mA} = 22800 = 2^{15} \quad (\text{Id } 22800 = \log 22800 / \log 2 = 14.48) \rightarrow 16\text{-bit Variable}$$

$$\text{Range } \pm 40 \text{ A} / 5 \text{ mA} = 8000 = 2^{13} \quad (\text{Id } 8000 = \log 8000 / \log 2 = 12.97) \rightarrow 16\text{-bit Variable}$$

Die Stromgeneratoren im Flugzeug liefern keine konstante Frequenz, vielmehr variiert diese innerhalb eines definierten Bereichs („Wild Frequency“). Unter Berücksichtigung des tolerierbaren Frequenzbereichs ergibt sich mit dem Nyquist-Theorem die Mindestabtastfrequenz:

$$\text{Frequenz-Auflösung } f = 300 \dots 800 \rightarrow 2 * f = 1600 \text{ Hz (Minimum)}$$

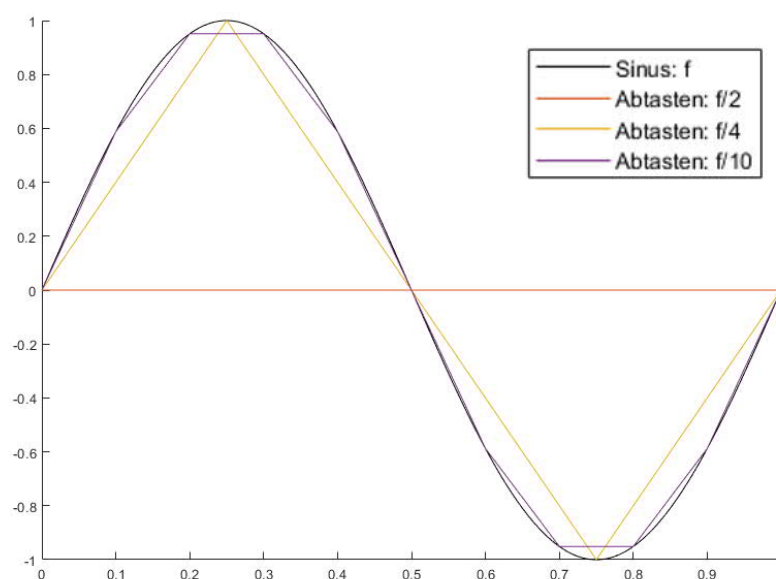


Abbildung 12: Diskretisierung eines Sinusverlaufes mit unterschiedlichen Abtastraten



Diese Mindestabtastfrequenz ( $f/2$ ) ist jedoch ungeeignet, da die Form des Stromverlaufs nur ungenau angenähert wird. In der Abbildung 12 sind mehrere Abtastraten dargestellt. Für eine Untersuchungen von charakteristischen Stromkurven erscheint es sinnvoll, wenn der Sinusverlauf mit mindestens 10 Punkten pro Sinusperiode abgetastet wird. Somit wären Abtastraten von mindestens 8 kHz notwendig. Um eine bessere Auflösung des Signals zu ermöglichen, wird jedoch eine Abtastrate von 16 kHz angestrebt.

Zusammen mit der Speichertiefe und der Abtastrate ergibt sich die Datenrate, die vom Mikrocontroller pro Sekunde verarbeitet werden muss:

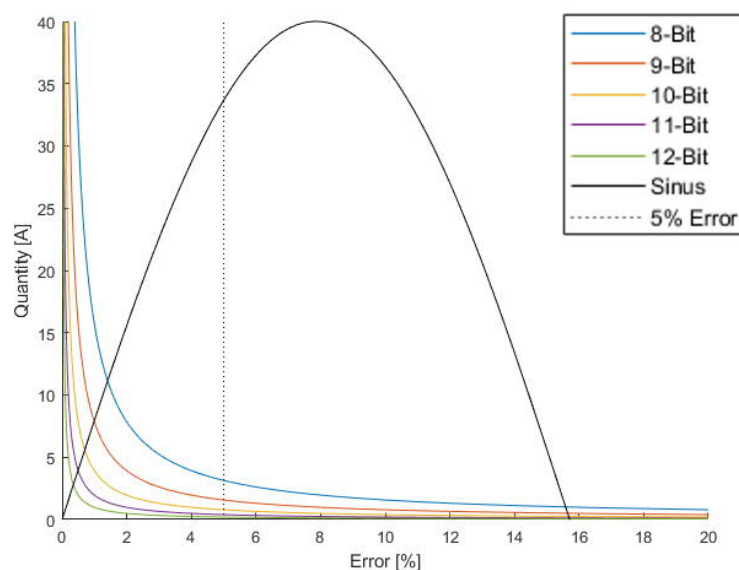
$$16 \text{ kS/s mit 16-bit Variable} = 16 \text{ kHz} * 2 \text{ B} = 32 \text{ kB/s}$$

### II.1.3.2 Messauflösung und Messfehler

Anschließend wurde der zu erwartende Messfehler abgeschätzt, der sich bei der Strommessung ergibt. Die vertikale Auflösung beträgt bei dieser Beispielbetrachtung  $I_{\text{RANGE}} = +40 \text{ A}$ . Die Genauigkeit der Strommessung hängt vom Verhältnis des elektrischen Stroms zur Auflösung der Digitalisierung ab (mit  $X$  = Anzahl der Bits des A/D Wandlers), hier also:

$$\text{Auflösung} = 40 \text{ A} / 2^X$$

Die generelle Frage nach dem zu erwartenden Messfehler kann nicht beantwortet werden, da zu viele unbekannte Faktoren vorliegen. Allerdings lässt sich abschätzen, wie groß der kleinstmögliche bestimmbare Fehler sein kann. Dies ist der Messfehler, der durch das sogenannte „Flippen“ eines Bits entsteht. Das Verhalten des resultierenden relativen Fehlers in Abhängigkeit der zu messenden Stromstärke für verschiedene digitale Auflösungen ist in Abbildung 13



dargestellt.

Abbildung 13: Kleinstmöglicher relativer Messfehler infolge eines Bitflips

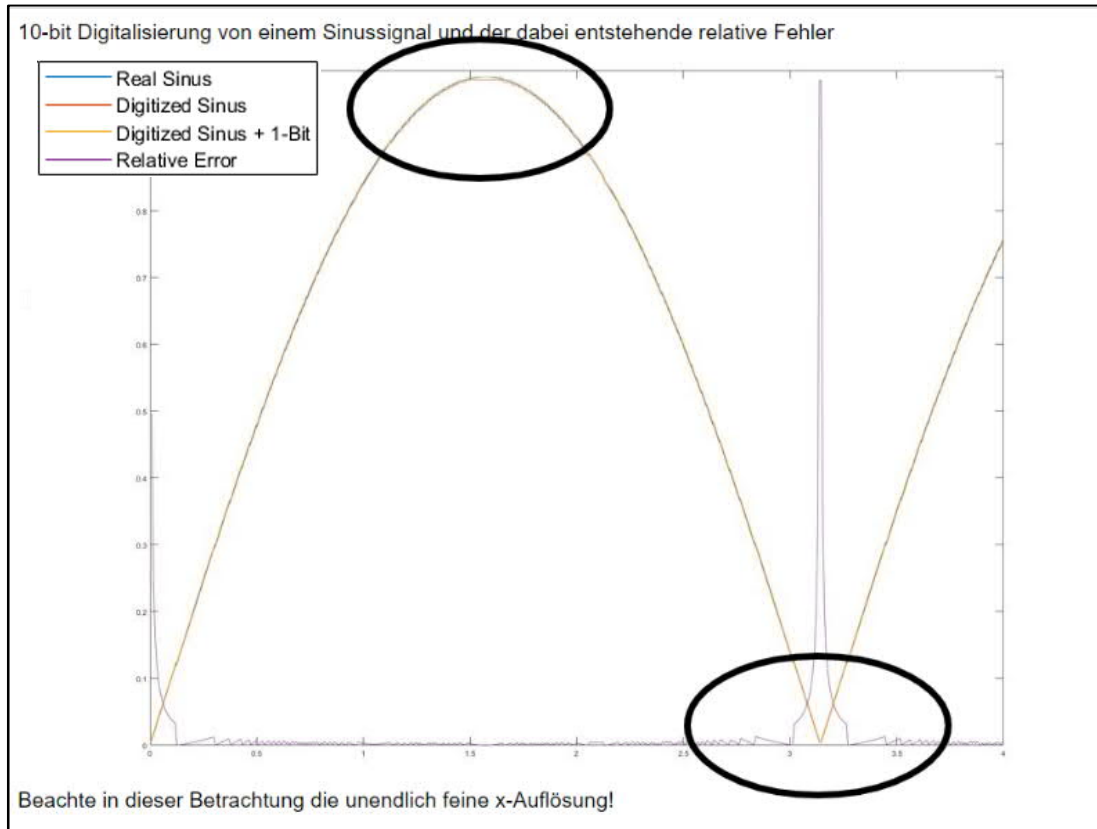


Abbildung 14: Relativer Fehler einer Sinus-Halbperiode bei 10-Bit Digitalisierung

Des Weiteren wurde die Annahme getroffen, dass 5% Abweichung tolerierbar sind. Für die in Abbildung 14 aufgeführte Betrachtung wurde ein 10-Bit A/D Wandler gewählt, was in einer Auflösung von  $40 \text{ A} / 2^{10} = 39 \text{ mA}$  resultiert. Es ist deutlich zu erkennen, dass der relative Fehler bei Werten nahe Null gegen unendlich läuft. Aus Abbildung 13 und Abbildung 14 lässt sich erkennen, wie groß in Abhängigkeit der Datenauflösung die Abweichung bei der Strommessung einer Sinus-Halbperiode wird, wenn ein Bit flippt.

### II.1.3.3 Messbereich

Vertikal Auflösung bei Beispielbetrachtung mit  $I = +40 \text{ A}$ . Bei der Abtastung eines Sinus ergibt sich die in Abbildung 15 dargestellte 5% Fehler-Verteilung in Abhängigkeit der Sensor Bit-Auflösung.

Nach mehrfacher numerischer Analyse der Messeigenschaften diverser Stromsensoren wurde eine optimale Kombination von Parametern identifiziert. Für einen Stromsensor mit einem Messbereich von  $I = 40 \text{ A}$  und 10-Bit A/D-Wandlung sowie unter der Annahme, dass der zu



messende Strom einen reinen Sinusverlauf annimmt, kann folgende Aussage über die Messgenauigkeit getroffen werden.

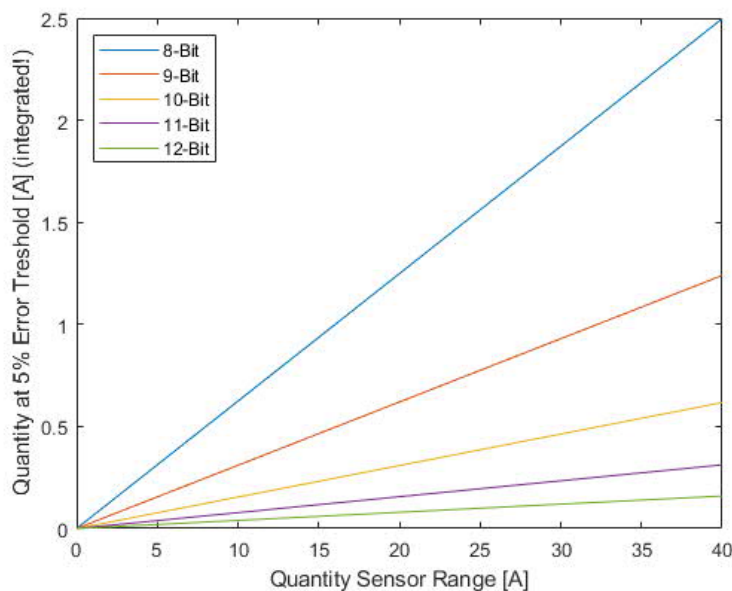


Abbildung 15: 5% Fehlerverteilung in Abhängigkeit der Sensor Bit-Auflösung

Es können bei Strommessung mit integrierendem Charakter Ungenauigkeiten (Abweichungen) von über 5% auftreten, sobald die Integral-Messwerte  $\sim 610$  mA unterschreiten. Diese Abweichungen resultieren aus digitalen Abweichungen bei der A/D Wandlung (vertikaler Fehler). Der horizontale x-Auflösungseinfluss wird hier nicht berücksichtigt. Ferner sind signifikante analoge Fehler wie Rauschen, elektromagnetische Strahlung, Potential-Offsets etc. zu berücksichtigen.

#### II.1.3.4 Vertikale Auflösungen

Die Anforderungen an die Strommessung sind hoch, trotzdem müssen einige Kompromisse eingegangen werden, wie in Abbildung 16 skizziert wird.

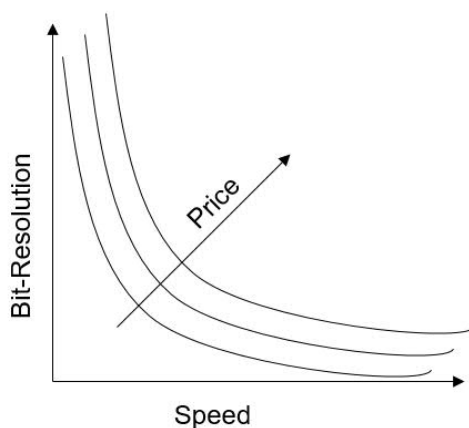


Abbildung 16: Zusammenhang der Messauflösung und der möglichen Erfassungsgeschwindigkeit

Es wurden über ein Dutzend unterschiedliche Sensoren hinsichtlich ihrer Eignung überprüft. Die meisten digitalen Consumer-Sensoren weisen folgende Kennwerte auf:

Bits: 7 ... 10 (12, 14 ... 24 für Spezialfälle wie Drehencoder)

Für professionelle Multimeter gilt:

Bereich:  $\pm 10$  A

Auflösung: 10 mA

Bits: = 10 ... 11

Oszilloskope weisen i.A. folgende Kennwerte auf:

Bits: 8 ... 10 (High End: 12 ... 14 (nur bei niedriger Frequenz))

Für Datenerfassungsanlagen gilt:

Bits: 8 ... 14 (... 16 mittlere Geschwindigkeit, ... 24 geringe Geschwindigkeit ... 32 quasi statisch).

#### II.1.4 Komponentenauswahl und -entwicklung

Basierend auf den erfolgten Vorbetrachtungen erfolgte die Komponentenauswahl und -entwicklung. Ein kurzer Einblick in einige Bestandteile wird im Folgenden gegeben.

##### II.1.4.1 Mikrocontroller

Für die Wahl des Mikrocontrollers mit integriertem Analog-Digital-Wandler wurden folgende Randbedingungen definiert:

Realer Mikrocontroller:	ATmega644 Family
Maximale Variablengröße:	32-Bit
Daten- & Programmspeicher:	64 kB
Arbeitsspeicher:	4 kB
AD-Wandler:	10-Bit
Hardware ADC Rate 8-Bit:	200 kHz (10-Bit: 50 kHz)
Reale Sampling Rate mit Wertverarbeitung während Programmablauf (z.B. Speichern, Ausgabe ...):	< 10 kS/s

Aus den Kenngrößen der Hardware ergibt sich, dass der vorhandene Arbeitsspeicher theoretisch für 2048 10-Bit Messwerte ausreicht. In der Praxis zeigte sich, dass die Speicherung von 1000-1200 Messwerten realisierbar ist. Um Effektivwerte aus 10-Bit Messwerten zu berechnen, können ohne Variablen-Überlauf maximal  $2^{32} / ((2^{10})^2) = 2^{12} = 4096$  Messwerte summiert werden.

Die Datenverarbeitung führt zu Verzögerungen und Unterbrechungen im Messprozess. Somit ist eine kontinuierliche Messung nicht möglich. Daher kann auf dem Mikrocontroller keine komplexe Mathematik wie Radizieren oder Dividieren erfolgen.

Für eine vollständige Abtastung einer Sinusperiode von 1/800 Hz ergibt sich:

- eine Mindestabtastrate von 800 kS/s um etwa 1000 Messwerte pro Periode zu erfassen
- 10 Messpunkte innerhalb einer Sinusperiode bei einer Abtastrate von 8 kS/s
- bei einer Abtastrate von 8 kS/s ergibt sich eine Messzeit von höchstens 0,125 s, also ca. 100 Periodenlängen

Diese Grenzen sind durch die Wahl der Hardware gegeben.

## Lösungen

Um die Strommessung optimal realisieren zu können, wurden mehrere Konzepte erarbeitet und bewertet:

1. Zwei serielle analoge Stromsensoren 40 A und 2 A an einem HighRes ADC Kanal mit Jumper/Schalter wählbar
2. Zwei serielle analoge Stromsensoren 40 A und 2 A an zwei ADC Kanälen (jeweils ein High Resolution und ein Low Resolution Sensor)
3. Socket für beliebige Stromsensoren auf Mini-Platine an einem HighRes ADC Kanal
4. Ein ideal gewählter Stromsensor an einem HighRes ADC Kanal (zwei Designs mit jeweils eigener Seriennummer)
5. Zwei serielle Stromsensoren 40 A und 2 A, HighRes analog an einem ADC Kanal und LowRes digital an I2C
6. Mehrere serielle digitale I2C LowRes Stromsensoren 1, 2 ... 40, 80A, Parallelmessung, der Code wählt den jeweils geeigneten selbsttätig aus

Bei der Bewertung der verschiedenen Lösungsmöglichkeiten ist festzuhalten, dass alle Versionen Vor- und Nachteile haben. Version 1, 3 und 4 sind jedoch am schnellsten realisierbar und haben den aktuell höchsten Entwicklungsstand. Version 2 ist möglich, birgt aber Risiken aufgrund der Komplexität des Codes (aufgrund der Messunterbrechungen). Version 5 und 6 sind theoretisch und entwicklungstechnisch noch unausgereift.

Von den aufgeführten Lösungsansätzen wurde Version 4 ausgewählt, da diese in einem anderen Zusammenhang bereits erprobt wurde und auf die gemachten Erfahrungen zurückgegriffen werden konnte.

Es wird nur ein Sensor auf der Platine installiert. Durch die Verwendung von sog. Hybrid-Footprints ist es aber möglich, andere Sensoren zu Testzwecken zu installieren. Somit ist Version 3 im Bestückungskonzept der Platine berücksichtigt worden, ohne eine zusätzliche Platine ("Mini-Platine") zu verwenden.

Bei simulierten Strommessungen unter Laborbedingungen haben sich die hier vorgestellten Betrachtungen bestätigt. Die gemachten Kompromisse bei der Wahl der Hardware und die Bemühungen, die Software zu optimieren, ermöglichten es, drei verlässliche Strommessverfahren im Mikrocontroller zu implementieren und in Testreihen miteinander zu vergleichen. Alle drei Verfahren lieferten ähnlich gute Messergebnisse.

#### II.1.4.2 Platine

Die folgenden Schritte waren zur Vorbereitung des Platinen-Layouts notwendig:

- Konzepterstellung, Definition der Anforderungen
- Datenblatt-Recherche bzgl. geeigneter Komponenten
- Numerische Simulation des Konzepts mittels Matlab®
- Auswahl der Komponenten

Es war zu klären, ob „manuelles“ oder automatisches Routing vorgenommen werden soll. Automatisches Routing mithilfe von Designprogrammen ist für die Erstellung von Platinen, die in großer Stückzahl hergestellt werden, sinnvoll. Für den Bau eines Funktionsmodells ist der zeitliche Aufwand hingegen zu groß, weshalb entschieden wurde, manuelles Routing anzuwenden.

Das Platinen-Design folgt dem in Abbildung 17 abgebildeten Hardware-Schema.

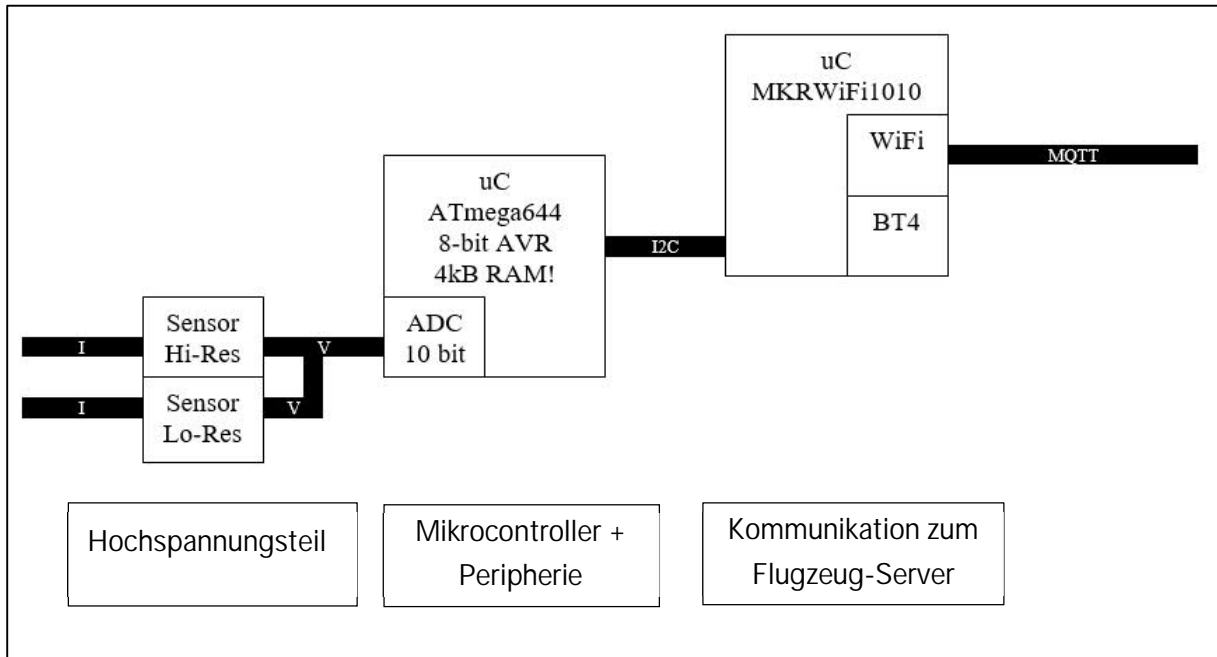


Abbildung 17: Hardware-Schema der Platine des Mess-Sendemoduls

Der Informationsfluss innerhalb des in Abbildung 17 dargestellten mittleren Blocks „Mikrocontroller + Peripherie“ wird in Abbildung 18 schematisch dargestellt.

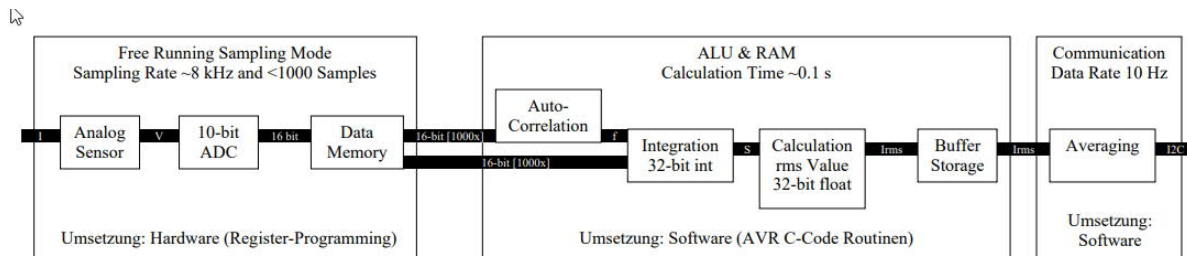


Abbildung 18: Informationsfluss

Die Platine des Mess-Sendemoduls (Abb. 19: Oberseite, Version 3.7) besteht aus vier übereinanderliegenden Ebenen, die in Abb. 20 einzeln dargestellt sind. Die breiteren Leiterbahnen des Hochspannungsteils sind entsprechend den im geplanten Umfeld zu erwartenden Stromlasten dimensioniert. Abb. 21 zeigt die Unterseite der Platine.



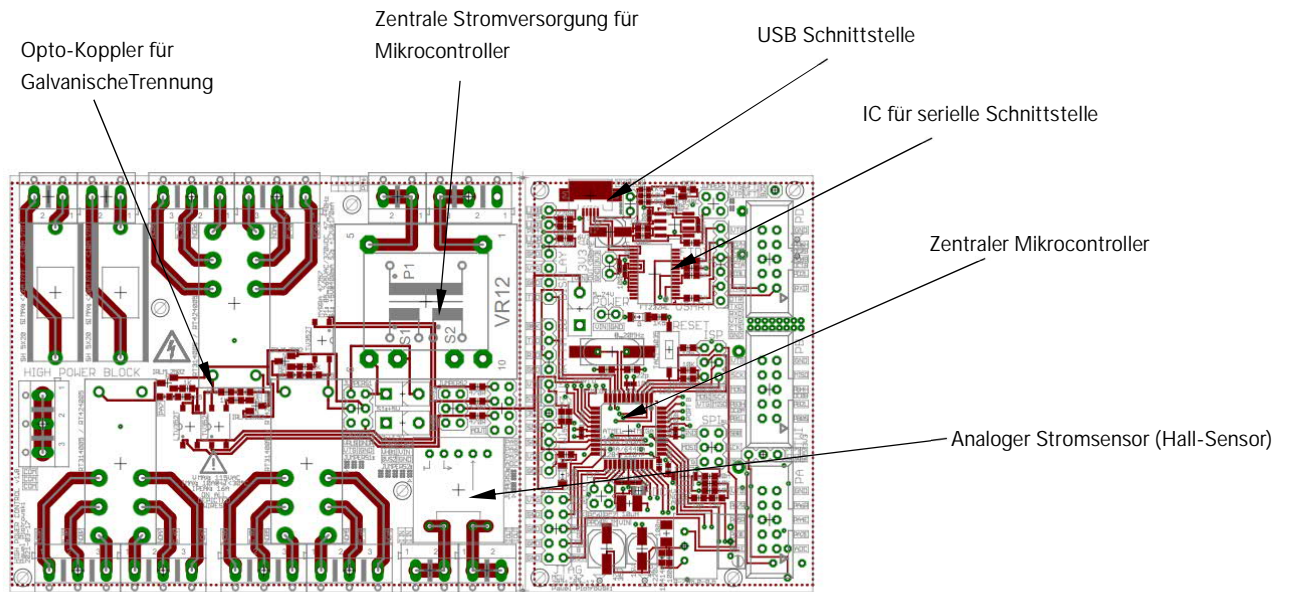


Abbildung 19: Platine des Mess-Sendemoduls: Draufsicht

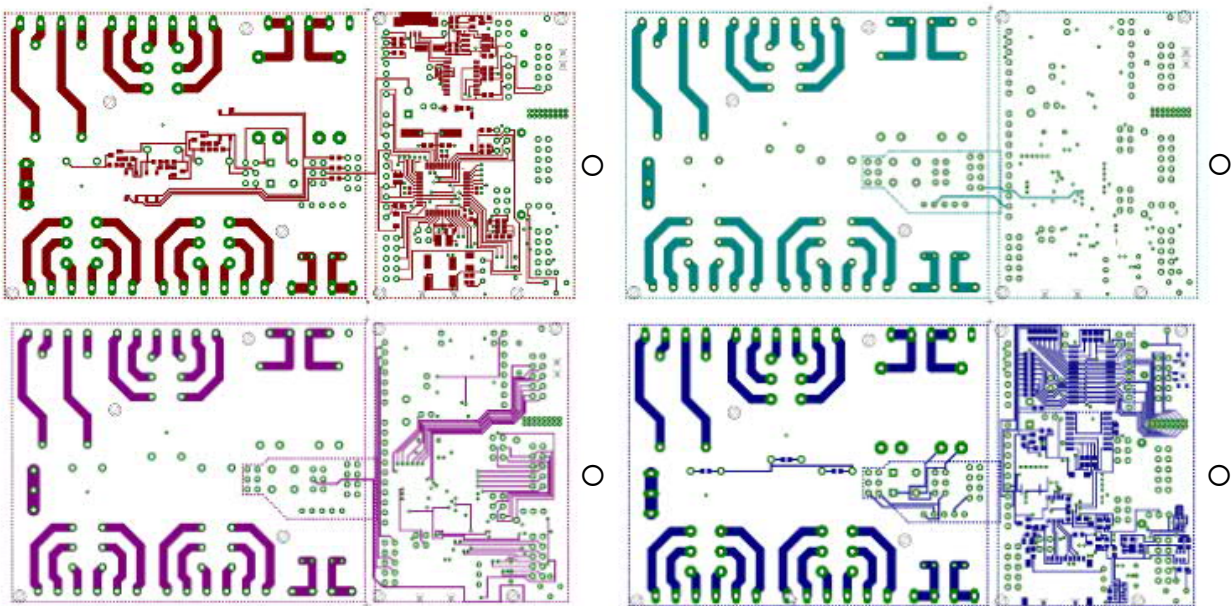


Abbildung 20: Ebene 1 bis 4 der Platine des Mess-Sendemoduls

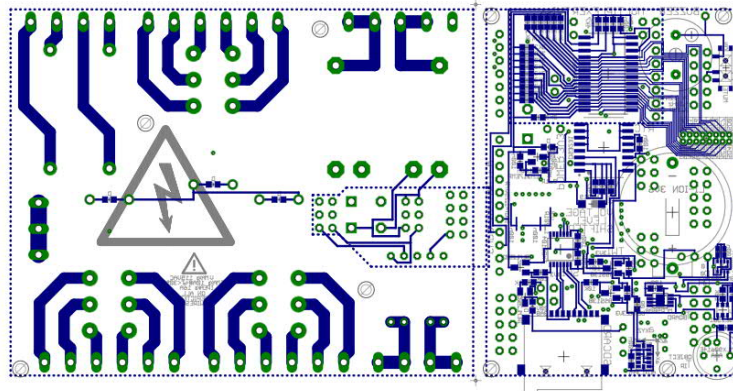


Abbildung 21: Untersicht der Platine des Mess-Sendemoduls

#### II.1.4.3 Gehäuse-Design

Wie in Abbildung 11 angedeutet, soll das Mess-Sendemodul innerhalb der Kabine eines Flugzeugs installiert werden. Die strommessende Variante des Mess-Sendemoduls benötigt keine eigene Spannungsversorgung, sondern wird aus der Versorgungsleitung der zu überwachenden LRU gespeist. Da das Mess-Sendemodul auch nachträglich – z.B. in einer Galley – einbaubar sein soll, muss das Gehäuse spritzwasser- und staubdicht ausgeführt werden. Das Gehäuse muss volumenoptimiert sein. Der Prototyp ist mittels 3D-Druck bei LHT hergestellt worden. Das Gehäuse enthält die Platine sowie die Anschlüsse zur Stromversorgung.

#### II.1.4.4 Software-Erstellung

Der Kommunikationsteil des Mess-Sendemoduls dient dem Datenaustausch zwischen Mess-Sendemodul und Cabin Server (Flugzeug).

Für das Mess-Sendemodul wurden mehrere Software-Komponenten entwickelt, die der Erfassung und Filterung der Daten, der Paketierung, der Kompression und der Übertragung dienen – siehe Abbildung 22. Die Komponenten zur Erfassung und Filterung wurden als C-Applikationen für den STM32 Cortex M umgesetzt. Von entscheidender Bedeutung war hierbei eine hocheffiziente Datenverarbeitung, damit auch hochauflösende Aufzeichnungen möglich sind. Der Code wurde mit STM32CubeIDE übersetzt und auf den internen Flashspeicher des Evaluationsboards kopiert.

Für die Übertragung der Messdaten wurden im Projekt unterschiedliche Formen der Paketierung betrachtet und bewertet. Hierbei wurden auch die laufenden Entwicklungen der Arbeitsgruppe CSMIM aus dem ARINC CSS Komitee berücksichtigt (Abbildung 23). Die relevantesten Standards zur Übertragung von Daten waren zu dieser Zeit CoAP und MQTT, letzteres fand im Projekt Anwendung.



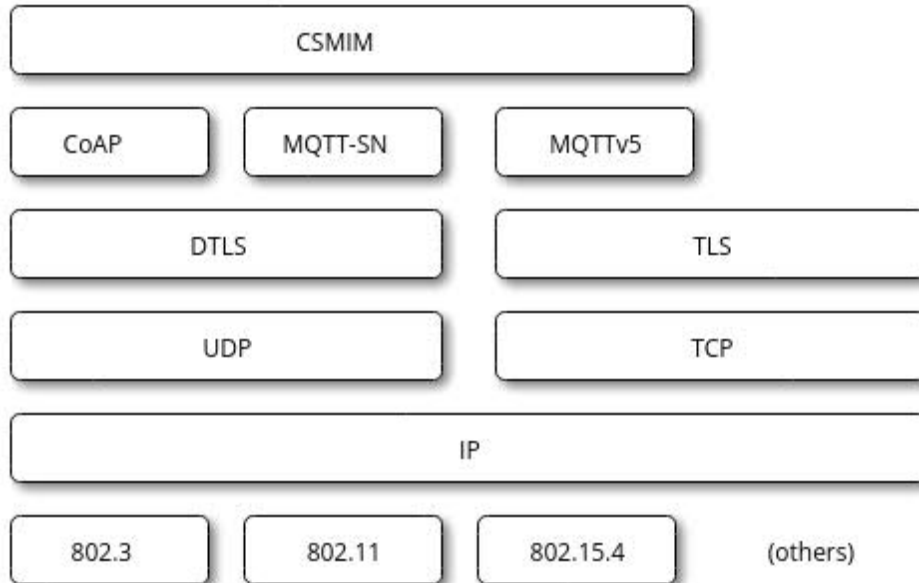


Abbildung 22: ARINC CSMIM Protokoll-Stapel (zum Zeitpunkt der Erstellung)

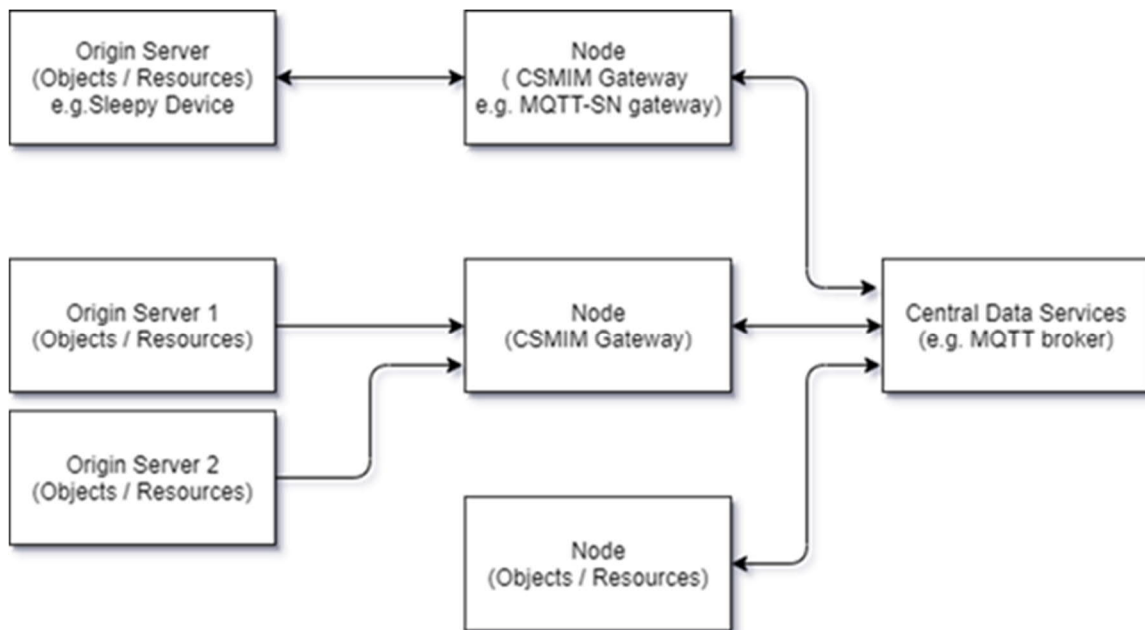


Abbildung 23: ARINC CSMIM zentralisierte Architektur (zum Zeitpunkt der Erstellung)

Da im MQTT keine Aussage über das Format der Nutzdaten getroffen wurde, muss für das Mess-Sendemodul eine geeignete Codierung gefunden werden, die den Anforderungen des Anwendungsfalls Rechnung trägt:

- effizient - auch auf einfachen Mikrocontrollern umsetzbar
- kompakt hinsichtlich Speicherbedarfs
- flexibel, für unterschiedliche Anwendungsfälle anpassbar

Es gibt eine Reihe kompakterer Codierungen, die geeignet sind, wie z.B. das im RFC 8949 spezifizierte CBOR. Es wurde ein Format gewählt, bei dem eine Reihe von Messdaten von einem oder mehreren Sensoren abgebildet werden kann. Jede Messreihe beginnt mit einem absoluten Messwert, alle Folgewerte werden als Differenz zum vorigen Wert gespeichert. Dies führt im Normalfall (der gemessene Parameter ändert sich meistens nur graduell oder auch gar nicht) zu einer sehr kompakten Darstellung, da in CBOR die Wortbreite eines Zahlwerts von seiner Größe abhängt. Hierdurch ergibt sich eine Art von Datenkompression, die im Gegensatz zu komplexen Algorithmen, wie sie im Computerbereich eingesetzt werden (z.B. LZV), nur sehr wenig Rechenzeit und Speicher benötigt.

## II.1.5 Umsetzung eines Konzeptdemonstrators

Zum Abschluss der Entwicklungsbetrachtungen soll ein kurzer Einblick in die erste Prototypenumsetzung und damit durchgeführten praktischen Tests gegeben werden. Im Rahmen von Tests des Software-Pakets wurde die Stromaufnahme einer für die Luftfahrt zugelassenen Kaffeemaschine bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen gemessen und erfasst. Für die Visualisierung der Messdaten wurde die freie Software gnuplot eingesetzt.

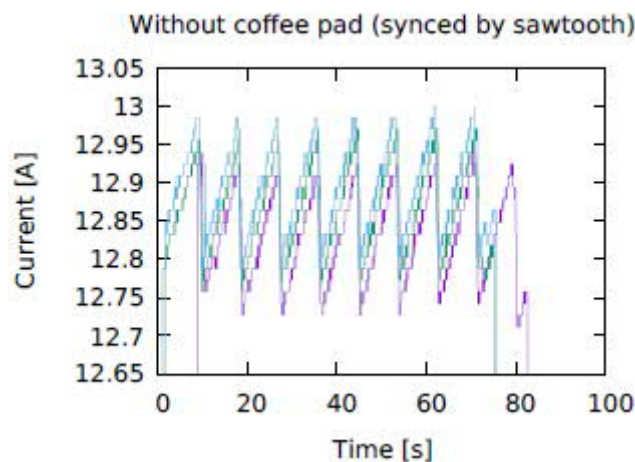


Abbildung 24: Exemplarischer Verlauf des Stroms bei mehreren Brühvorgängen

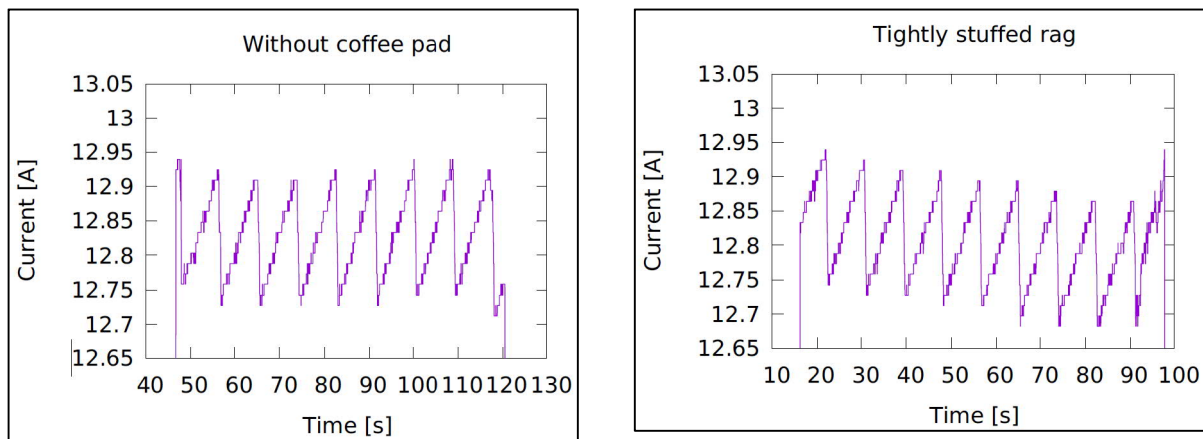


Abbildung 25:: Zeitlicher Verlauf des aufgenommenen Messstroms in Abhängigkeit von zu Testzwecken induzierten Zuständen. Links: Betrieb ohne eingelegtes Kaffee-Pad; der Absolutwert der Stromaufnahme liegt niedriger, ein Rückgang des Mittelwerts ist hier nicht zu beobachten. Rechts: Betrieb mit einem fest gestopften Stofflappen; geringerer Absolutwert, sinkender Mittelwert, Ausschlag nach oben kurz vor Ende.

Die in Abbildung 24 dargestellte Stromaufnahme zeigt den typischen Verlauf während eines Brühvorgangs der Kaffeemaschine. Es wurden Brühvorgänge mit unterschiedlichen Gerätekonfigurationen vorgenommen, um Störfälle zu simulieren und die dabei gemessenen

Stromverläufe zu vergleichen. So wurden Brühvorgänge ohne Kaffeebeutel durchgeführt (Abbildung 25 links) oder anstelle des Kaffeebeutels gefaltete Leinentücher eingelegt (Abbildung 25 rechts). Dabei konnten Veränderungen der Stromaufnahme gezeigt werden.

Um den Zustand einer LRU aufgrund ihrer Stromaufnahme zu beurteilen, ist es notwendig, zwischen Normalfall- und Fehlerfall-Charakteristik unterscheiden zu können. Dies konnte im vorliegenden Vorhaben bislang nicht systematisch untersucht und gelöst werden. Eine wichtige Aufgabe für die Weiterentwicklung des Mess-Sendemoduls ist daher die eingehende Untersuchung dieser Messwert-Charakteristik.

Die Tests wurden in der Flugzeug-Galley im Kabinen-Mock-Up der LHT im Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung (ZAL) durchgeführt. Ein Einblick in die Messungen mit dem ersten Versuchsmodell des Mess-Sendemoduls kann Abbildung 27 und Abbildung 28 entnommen werden.



Abbildung 27: Kabinen-Mock-Up (Galley)

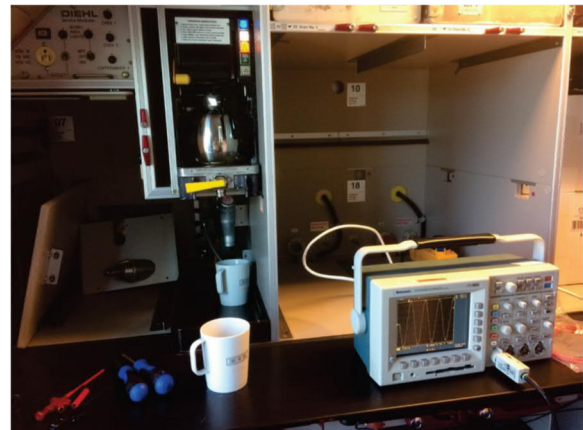


Abbildung 28: Testaufbau im Kabinen-Mock-Up

Eine isolierte Betrachtung des ersten Demonstrators während der Tests ist in Abbildung 22 dargestellt. Zusätzlich zeigen die Abbildungen 29 bis 31 Detailansichten des zweiten Versuchsmodells.

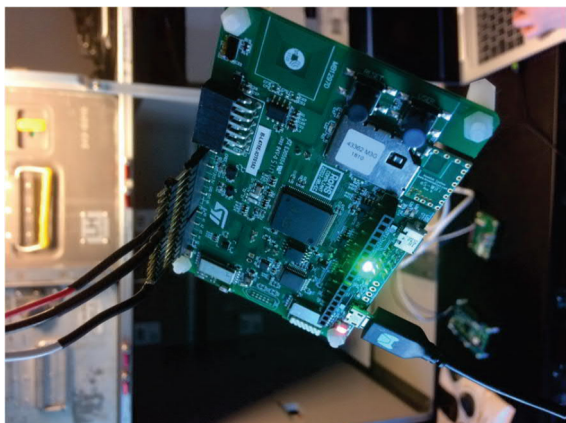


Abbildung 29: Erprobung des ersten Demonstrators



Abbildung 30: Zweiter Demonstrator

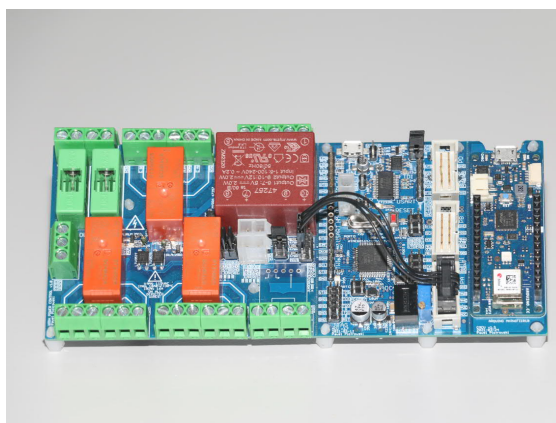


Abbildung 31: Zweiter Demonstrator

Darüber hinaus konnte im Rahmen der durchgeführten Tests gezeigt werden, dass eine Zustandsgröße einer LRU – hier exemplarisch die Stromaufnahme einer Kaffeemaschine – mittels des Mess-Sendemoduls drahtlos an einen Server übermittelt werden kann. Da die Stromaufnahme der überwachten LRU bei Störungen charakteristische Veränderungen aufweist, kann eine sich anbahnende Störung des Geräts somit registriert und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Da aufgrund der Funkübertragung eine Verkabelung des Moduls nicht erforderlich ist und seine Spannungsversorgung über die Versorgung der LRU erfolgt, lässt sich dieses Modul universell in der Flugzeugkabine einsetzen.

## II.1.6 Ergebnisse und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens MICHEL wurden von den Verbundpartnern zu den verschiedenen Arbeitspaketen unterschiedliche Konzepte entwickelt und vertieft. Neben der geplanten primär beratenden Tätigkeit der LHT konnte durch das Unternehmen das Funktionsmodell eines Mess-Sendemoduls entwickelt werden, welches die Stromaufnahme einer elektrischen Komponente innerhalb der Flugzeugkabine überwacht und Messwerte per Funksignal an den Kabinen-Controller sendet, um eine kontinuierliche Überwachung der Komponente zu gewährleisten.

Das bedeutet, dass gewonnene Messwerte interpretiert werden müssen. Hierzu ist es notwendig, das charakteristische Stromaufnahme-Verhalten der zugehörigen Komponente zu kennen, ebenso wie die Veränderung dieses Verhaltens bei Störungen. Zur Ermittlung der Messwerte bei Routine- sowie Störbetrieb kann das Mess-Sendemodul selbst verwendet werden. Wie ansatzweise am Beispiel der Kaffeemaschine bereits demonstriert wurde, wird es notwendig sein, Störungen zu simulieren, um Veränderungen in der Stromaufnahme eines zu überwachenden Geräts interpretierbar zu machen.

Für die zukünftige Nutzung des Mess-Sendemoduls ist somit zunächst eine umfangreiche Datenerfassung notwendig, die beispielsweise an LRUs im Linienbetrieb eines Passagierflugzeugs mithilfe des Mess-Sendemoduls vorgenommen werden kann.

Die aus dem Abgleich der Messergebnisse aus Standard- und Störungsbetrieb gewonnenen Schwellwerte, die einen Störfall anzeigen, müssen in eine Überwachungssoftware übertragen werden.

Um die in diesem Bericht erwähnte „Prozesslandschaft“ zu gestalten, d.h. die Umsetzung einer Fehlermeldung in eine Reaktion wie z.B. die Bereitstellung und den Einbau eines Ersatzgeräts, ist es notwendig, die bei LHT vorhandenen Strukturen hinsichtlich der Ersatzteil-Logistik mit dem flugzeugseitigen Überwachungssystem zu verknüpfen. Innerhalb dieser Prozesslandschaft nimmt das Mess-Sendemodul eine wichtige Rolle ein.

## II.2 Erläuterung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Plankosten der Gesamtvorkalkulation wurden in allen 4 geplanten Positionen signifikant unterschritten. Somit wurde auch die Summe der Gesamtvorkalkulation deutlich unterschritten. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass in der Arbeitsteilung im Konsortium die Arbeitspakete gegenüber dem ursprünglichen Plan neu dimensioniert wurden.

Da zum großen Teil bestehende Versuchsaufbauten und vorhandene Geräte verwendet werden konnten, setzt sich die Selbstkostennachkalkulation im Wesentlichen aus Personalkosten zusammen.



### II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten waren zur Erreichung der dargestellten Ergebnisse notwendig. Im Mittelpunkt des unternehmerischen Interesses der Verbundpartner liegen die Sicherung und der Ausbau des technologisch hohen Standards in der Luftfahrtindustrie, verbunden mit dem Erhalt bzw. Ausbau von Arbeitsplätzen in den am Projekt beteiligten Firmen sowie übergeordnet am Luftfahrtstandort Deutschland. Dies wird unter anderem erreicht, wenn die Verbundpartner ihre Position in der Wertschöpfungskette festigen und ausbauen können und es gelingt, neue Produkte und Services – im Netzwerk mit Partnern – erfolgreich am Markt zu platzieren.

Nicht als zielführend erkannte Ansätze wurden in der weiteren Bearbeitung auf ein Minimum reduziert oder gar eingestellt. Auch die für das Vorhaben geschaffenen Versuchsaufbauten wurden hinsichtlich Notwendigkeit und Angemessenheit lediglich zur Konzeptvalidierung erstellt, nicht jedoch als Prototyp beschafft bzw. integriert.

### II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die Lufthansa Technik wird die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse im Anschluss an das Verbundvorhaben kontinuierlich weiterentwickeln und versuchen, diese in ihr Produkt- und Serviceportfolio zu integrieren, um gemeinsam mit Partnern der Wertschöpfungskette Innovationen entwickeln zu können.

Insbesondere das entwickelte Funktionsmodell eines Mess-Sendemoduls zur PHM-Integration wird in Folgeprojekten weiterentwickelt und in einem größeren Rahmen, der auch den Kabinen-Server und dessen zentrale Rolle im PHM-Prozess umfassen wird, getestet.

Als natürlicher und angestrebter Erstkunde sind nach wie vor die Fluggesellschaften der Lufthansa Group (Lufthansa, Swiss, Austrian Airlines, Brussels Airlines sowie Eurowings) als auch andere Airline-Kunden der Lufthansa Technik zu nennen.

### II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Der sich abzeichnende Trend zu verstärkten Digitalisierungsbemühungen in der Luftfahrt und insbesondere im Bereich Flugzeugkabine hat sich während der Vorhabenslaufzeit weiter verstärkt. So haben Vertreter des assoziierten MICHEL-Partners Airbus von ähnlichen Überlegungen zu PHM berichtet, ohne dass hierüber konkrete Angaben bzw. Veröffentlichungen genannt wurden. Ferner ist bekannt, dass die Fluglinie Etihad ebenfalls auf diesem Gebiet tätig ist. Hierzu sind allerdings bislang nur Präsentationen für einen brancheninternen Kreis veröffentlicht worden.

## II.6 Veröffentlichungen und Vorträge

Bislang sind keine Veröffentlichungen erfolgt. Im Rahmen der Folgeprojekte, in denen u.a. das PHM-Modul weiterentwickelt werden soll, sind Veröffentlichungen geplant.