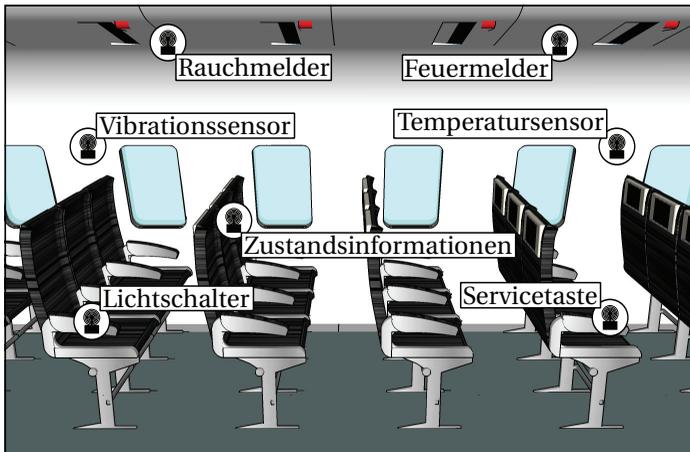




# 1 Motivation

In den Kabinen moderner Passagierflugzeuge ist bereits heute eine Vielzahl unterschiedlicher Sensoren installiert. Diese Sensoren sind derzeit ausschließlich durch kabel- beziehungsweise drahtgebundene Übertragungstechniken an die Avionik- und Kabinensysteme angeschlossen. Die Gesamtlänge der dafür erforderlichen Datenkabel kann hierbei bis zu 400 Kilometer betragen. Ihr Gewicht macht zwischen 2% und 5% des Gesamtgewichts eines Flugzeuges aus und hat damit einen maßgeblichen Einfluss auf dessen Kraftstoffverbrauch. Zudem ist die Installation der Datenkabel und notwendiger Halterungen bei der Montage eines Flugzeuges sowie deren Prüfung und Instandhaltung während der regelmäßig vorgeschriebenen Wartungsaufenthalte äußerst kosten- und zeitaufwändig.

Die fortschreitende Entwicklung der digitalen Funktechnik und die beständige Miniaturisierung der Elektronik erschließen viele Anwendungsbereiche, die bisher dem Einsatz drahtgebundener Kommunikationstechniken vorbehalten waren. Unabhängig vom Einsatz in der Flugzeugkabine werden drahtlose Sensornetzwerke oder selbst-organisierende Datenfunknetzwerke bereits heute in einer Vielzahl von unterschiedlichen Anwendungsbereichen eingesetzt [HMS09]. Die in diesen Anwendungsbereichen gesammelten Erfahrungen sollen genutzt werden, um ein drahtloses Datenfunknetzwerk zur Anbindung der Sensoren in einer Flugzeugkabine zu entwerfen.



**Abbildung 1.1:** Beispielanwendung für ein Datenfunknetzwerk in der Flugzeugkabine

Bereits heutzutage verwenden die Kabinensysteme moderner Passagierflugzeuge eine große Anzahl unterschiedlicher Sensoren, siehe Abbildung 1.1. In einem *Airbus A380* sind beispielsweise allein über 100 Sensoren zur präzisen Bestimmung der Temperatur in den einzelnen Kabinenabschnitten installiert. Ein weiteres Beispiel sind die in Kabine und Ladebucht installierten Feuer- und Rauchmeldesensoren.

Zukünftig können Passagiersitze mit einer geeigneten Sensorik automatisch erfassen, ob ein Sitz belegt, ein Passagier angeschnallt und ein Tisch korrekt arretiert ist. Die Arbeitsbelastung der Kabinenbesatzung wird dadurch verringert. Bisher ist hierfür vor jedem Start und jeder Landung eine visuelle Kontrolle durch die Kabinenbesatzung vorgeschrieben. Zusätzlich kann mit Hilfe neuartiger Sensoren

---

die Materialbelastung in kritischen Bereichen der Flugzeugstruktur kontinuierlich gemessen werden. Die Struktur im Umfeld der Kabinentüren ist beispielsweise hohen Belastungen durch Vibrationen ausgesetzt. Die Vibrationsbelastung kann mit neuartigen Sensoren erfasst werden, um die Wartungszyklen der entsprechenden Strukturelemente zu optimieren.

Das Ziel dieser Arbeit besteht deshalb in dem Entwurf eines Datenfunknetzwerkes, mit dem die bisher kabelgebundenen Übertragungssysteme durch eine drahtlose Übertragungstechnik ausgetauscht und die Messdaten der Sensoren per Funktechnik an die zentralen Auswerteeinheiten der Kabinensysteme übertragen werden können. Dort sollen die Messdaten wie bisher verarbeitet werden.

Wenn die Vielzahl der bereits existierenden Sensoren durch eine drahtlose Übertragungstechnik mit den Kabinensystemen verbunden wird, entfällt die aufwändige Verlegung der ansonsten erforderlichen Datenkabel. Die Sensoren verbleiben hierbei weiterhin über die vorhandenen Stromleitungen an die zentrale Energieversorgung des Flugzeuges angeschlossen. Neue Sensoren können mit Batterien ausgestattet werden. Bei dem Einsatz batteriebetriebener Sensoren kann auf die Verlegung von elektrischen Leitungen vollständig verzichtet werden.

Insgesamt können die Produktions-, Wartungs- und Betriebskosten eines Flugzeuges auf diese Weise deutlich gesenkt werden. Zudem begünstigt der Einsatz digitaler sowie drahtloser Datenfunknetzwerke die Gestaltung einer flexiblen und rekonfigurierbaren Kabineneinrichtung. Das Kabinenlayout kann schnell und kostengünstig an sich ändernde Bedürfnisse, Anwendungen sowie Anforderungen angepasst werden.



## *Kapitel 1 Motivation*

---

Die digitale Datenfunktechnik und die drahtlose Anbindung der Sensoren in der Flugzeugkabine sind daher auch für die Luftfahrt-industrie attraktiv und von hoher Bedeutung.



## 2 Einleitung

Der Einsatz digitaler Datenfunktechnik zur drahtlosen Vernetzung der Sensoren einer Flugzeugkabine ist ein Novum. Die für den Betrieb solcher Funksysteme erforderlichen internationalen Vorschriften werden derzeit entwickelt.

In dieser Arbeit wird die Vielzahl unterschiedlicher Sensoren betrachtet, die bereits heutzutage in einer Flugzeugkabine installiert sind. Bisher werden die von jedem Sensor ermittelten Messdaten mit einer drahtgebundenen Übertragungstechnik an eine zentrale Auswerteeinheit übertragen, dort ausgewertet und weiterverarbeitet. Die zur Datenübertragung erforderlichen Ressourcen können hierbei stets in einem ausreichenden Maß bereitgestellt werden. So ist jeder Sensor im Allgemeinen über ein eigenes Datenkabel, auf dem die erzeugten Messdaten fehlerfrei und in äquidistanten Abständen mit hoher Wiederholrate übertragen werden, an eine zentrale Auswerteeinheit angeschlossen. Aus technischer Sicht unterliegt die drahtgebundene Übertragung von Messdaten daher keinen nennenswerten Limitierungen. Allerdings führt der Einsatz dieser Technik an Bord eines Flugzeuges zu hohen Kosten und Gewicht.

Ziel dieser Arbeit ist der Entwurf eines selbst-organisierenden Datenfunknetzwerkes, mit dem die kabelgebundenen Übertragungstechnik ersetzt werden kann, um Kosten und Gewicht eines Flugzeuges zu senken. Die von den Sensoren erfassten Messdaten verblei-

ben hierbei unverändert, werden künftig aber in drahtloser Form zur zentralen Auswerteeinheit übertragen. Die hierfür zur Verfügung stehenden Ressourcen sind jedoch begrenzt. Zudem wird der Übertragungskanal von allen Sensoren gemeinsam verwendet und die drahtlose Übertragung der Daten ist nicht frei von Fehlern. Die Messdaten einer Vielzahl unterschiedlicher Sensoren müssen unter diesen Voraussetzungen effizient und zuverlässig übertragen werden. Eine technische Herausforderung in dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer robusten Übertragungstechnik und eines geeigneten Kanalzugriffsverfahrens.

In diesem Kapitel wird zunächst der Entwurf eines selbst-organisierenden Datenfunknetzwerkes beschrieben, in welchem die von den Sensoren erfassten Messdaten innerhalb der Kabine in digitaler Form von jedem Sensor drahtlos zu einer zentralen Auswerteeinheit übertragen werden. Daraufaufgehend wird detailliert auf die Randbedingungen eingegangen, die beim Einsatz eines solchen Netzwerkes in der Flugzeugkabine vorliegen. Abschließend wird die Aufgabenstellung beschrieben, welche den in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Untersuchungen zugrunde liegt.

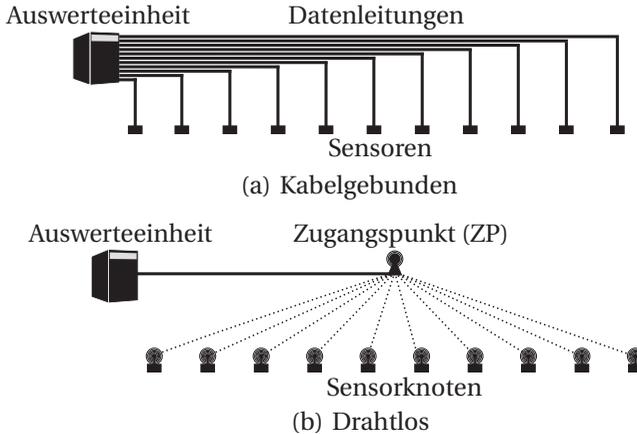
## **2.1 Datenfunknetzwerk**

Die in dieser Arbeit betrachteten Kabinensysteme bestehen zunächst aus einer Vielzahl von heute bereits installierten und integrierten Sensoren. Bisher sind diese Sensoren einzeln über separate Datenkabel mit ausreichender Kapazität an eine zentrale Auswerteeinheit angebunden, siehe Abbildung 2.1(a).

Damit das Messergebnis eines Sensors drahtlos an eine zentrale Auswerteeinheit übertragen werden kann, ist der Sensor mit einem Mi-

## 2.1 Datenfunknetzwerk

---

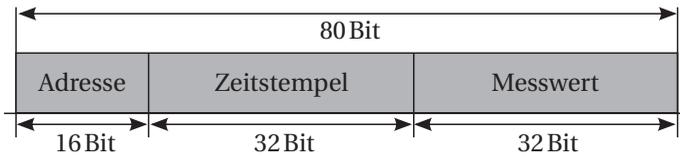


**Abbildung 2.1:** Vergleich der Architekturen

koprozessor, einem Transceiver und einer geeigneten Antenne auszustatten. Auf diese Weise ausgestattete Sensoren werden in dieser Arbeit auch als Sensorknoten bezeichnet.

Des Weiteren wird die Integration neuer Sensorknoten in der Flugzeugkabine betrachtet. Diese können bei Bedarf mit einer Batterie zur Stromversorgung ausgestattet werden. Batteriebetriebene Sensorknoten müssen nicht mehr wie bisher an die zentrale Stromversorgung des Flugzeuges angeschlossen werden und sind daher flexibler einsetzbar.

Um die von den Sensorknoten erfassten Messdaten den zentralen Auswerteeinheiten zuzuführen, ist die Installation von mindestens einem Zugangspunkt (ZP) in der Flugzeugkabine erforderlich. Ein ZP dient hierbei als Schnittstelle zwischen dem drahtlosen Datenfunknetzwerk und der drahtgebundenen Netzwerkinfrastruktur ei-



**Abbildung 2.2:** Aufbau eines Messdatums

nes Flugzeuges, wie beispielsweise dem *Avionics Full Duplex Switched Ethernet* (AFDX) oder dem *Cabin Intercommunication Data System* (CIDS) Bussystem, an welche die zentrale Auswerteeinheit angeschlossen ist. Die drahtlose Übertragung der Messdaten innerhalb des Datenfunknetzwerkes erfolgt ausschließlich von den Sensorknoten zum ZP. Die Positionen der Sensorknoten als auch des ZP in der Flugzeugkabine sind hierbei ortsfest. Der beschriebene Aufbau ergibt die in Abbildung 2.1(b) dargestellte sternförmige Topologie.

Ein Messdatum besteht unabhängig von dem betrachteten Kabinensystem stets aus dem eigentlichen Messergebnis, einem Zeitstempel und einer Identifikationsnummer beziehungsweise der Adresse des Sensorknotens, siehe Abbildung 2.2. Zur digitalen Abbildung einer physikalischen Messgröße, wie beispielsweise einer Temperatur, Spannung oder Vibration, sind 32 Bit ausreichend, um einen Messwert mit der erforderlichen Genauigkeit zu erfassen. Ein Zeitstempel mit einer Größe von 32 Bit erlaubt einen Messwert über einen Zeitraum von 50 Tagen auf eine Millisekunde genau zu datieren. Die Adressierung eines Sensorknotens erfolgt hierbei mit 16 Bit. Das beschriebene Format besitzt mit 80 Bit eine geringe Größe und ist für den vorgesehenen Einsatzzweck gut geeignet.

Kabinen moderner Passagierflugzeuge, wie beispielsweise eines Flugzeuges des Typs *Airbus A350*, besitzen eine Länge von circa 60 m

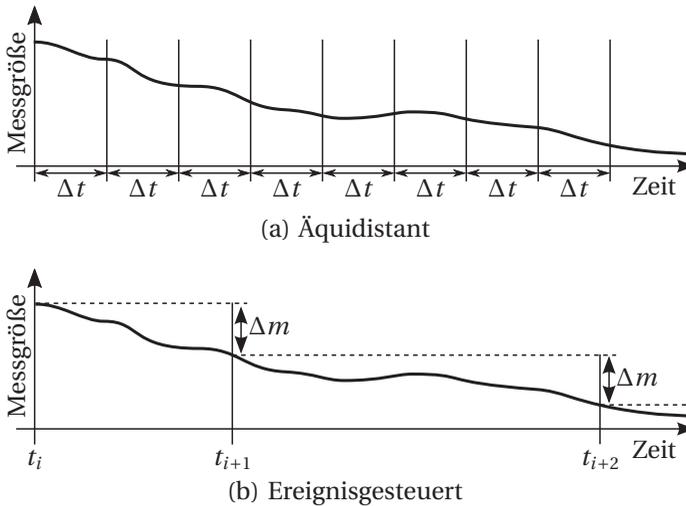
## 2.1 Datenfunknetzwerk

---

und einen Durchmesser von annähernd 6 m. Die begrenzten Abmessungen und die Vielzahl installierter Sensoren führen zu einer hohen Dichte von Sensorknoten in der Kabine. Obwohl das von einem einzelnen Sensorknoten produzierte Datenaufkommen gering ist, muss angesichts der hohen Sensorknotendichte von einem hohen aggregierten Datenaufkommen innerhalb des Datenfunknetzwerkes ausgegangen werden. Die Ressourcen, die dem Datenfunknetzwerk für die Übertragung dieses Datenaufkommens zur Verfügung stehen, sind jedoch begrenzt und werden von allen Sensorknoten gemeinsam verwendet. Es gibt keine exklusive Zuweisung der Ressourcen zu den Sensorknoten.

Was die Erzeugung und Übertragung der Messdaten betrifft, so erfolgt diese typischerweise in kurzen äquidistanten Abständen  $\Delta t$ , siehe Abbildung 2.3(a). Die Übertragung der auf diese Weise erzeugten Messdaten erfordert hohe Datenraten, die von drahtgebundenen Übertragungstechniken zur Verfügung gestellt werden können, in einem Datenfunknetzwerk jedoch nicht realisierbar sind. Deshalb werden die Messdaten alternativ mit einer ereignisgesteuerten Prozedur erzeugt. Hierbei sind alle Sensorknoten so konfiguriert, dass die Übertragung eines Messdatums veranlasst wird, sobald eine relevante Veränderung der beobachteten Messgröße festgestellt wurde. Stellt sich innerhalb einer gegebenen Zeit keine relevante Änderung der Messgröße ein, kann ein Sensorknoten ein zusätzliches Messdatum senden, um der zentralen Auswerteeinheit seine ordnungsgemäße Funktion zu signalisieren.

Die ereignisgesteuerte Übertragung von Messdaten ist beispielhaft in Abbildung 2.3(b) dargestellt. Die von einem Sensorknoten beobachtete Messgröße verändert sich in dem Zeitintervall  $t_{i+1} - t_i$ , so dass ein festgelegter Schwellenwert  $\Delta m$  überschritten wird. Der Sensorknoten erzeugt zum Zeitpunkt  $t_{i+1}$  ein Messdatum und veranlasst dessen Versand. Nach der Zeit  $t_{i+2} - t_{i+1}$  hat sich die beobach-



**Abbildung 2.3:** Prozedur zur Erzeugung von Messdaten

tete Messgröße erneut um einen Wert von  $\Delta m$  verändert. Der Sensorknoten veranlasst zum Zeitpunkt  $t_{i+2}$  den Versand eines weiteren Datums.

Zur drahtlosen Übertragung der Messdaten wird in dieser Arbeit die im *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 802.15.4 Standard spezifizierte physikalische Schicht als Grundlage verwendet. Die beschriebene Übertragungstechnik ist speziell für den Einsatz in drahtlosen Sensornetzwerken entwickelt worden und besitzt eine starke Fehlerkorrektur, welche eine zuverlässige und robuste Datenübertragung ermöglicht.

Datenpakete werden mit einer Rate von  $R_B = 256.000 \frac{\text{Bit}}{\text{s}}$  bei einer Signalbandbreite von  $B_S \approx 2 \text{ MHz}$  übertragen. Hierbei ist zu beachten,