

ELEMENTE EINES VERTEILTEN AUTOPILOTENSYSTEMS FÜR FORSCHUNG UND LEHRE

Arne Krüger

Institut für Flügführung - Technische Universität Braunschweig
Hermann-Blenk-Str. 27, 38108 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

Unbemannte Flugsysteme (UAS) sind als Gegenstand regelungstechnischer Fragestellungen, sowie als Kamera- und Instrumententräger für eine Vielzahl wissenschaftlicher Anwendungen interessant. Insbesondere der verstärkte Einsatz als Werkzeug interdisziplinärer Arbeitsgruppen verstärkt anwenderseitig die Forderung nach Flexibilität und Adaptierbarkeit an stetig wechselnde Anforderungen bei gleichzeitig hoher Zuverlässigkeit. Ausgehend von den Einsatzerfahrungen mit dem bewährten MINC Autopiloten wird ein in der Entwicklung befindliches verteiltes Avioniksystem vorgestellt, dessen flexibel konfigurierbare Steuergeräte über einen gemeinsamen, zweifach redundant ausgeführten Datenbus verbunden sind. Dieser Beitrag konzentriert sich auf den modularen Aufbau eines einzelnen Steuergerätes und erläutert exemplarisch, wie sich die gegenläufigen Forderungen nach Erweiterbarkeit, geringer Baugröße und überschaubarem Entwicklungsaufwand in Einklang bringen lassen.

1 Einleitung

Die automatische Bahnfolgeregelung unbemannter Starr- und Drehflügler mittels integrierter Navigation wurde vielfach demonstriert. Darüber hinaus wurden in den vergangenen Jahren bei vormals in Hinblick auf Leistung und Miniaturisierungsgrad kritischen Komponenten, wie beispielsweise Inertialsensoren, Bordbatterien und Prozessoren wesentliche Fortschritte erzielt. In der Folge erleben UAS zunehmend einen Wandel vom Gegenstand zum Werkzeug wissenschaftlicher Forschung, wofür beispielhaft das seit 2006 an der Universität Braunschweig entwickelte MINC Autopilotensystem und dessen Anwendung zur Luftbilderfassung [1] und meteorologischen Untersuchung der bodennahen Grenzschicht [2, 3] steht.

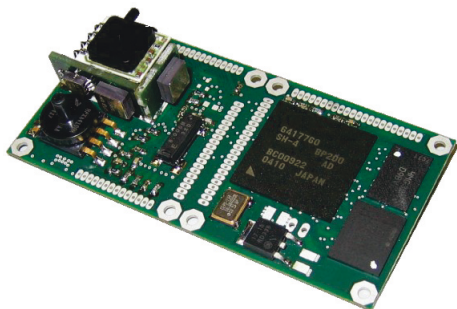


Abb. 1: MINC Autopilot, 80 mm × 40 mm × 16 mm, Masse 16 g, dargestellt ohne GPS- und Funkmodem

Trotz immer neuer Anwendungsfelder und zunehmender Verbreitung sind UAS im wissenschaftlichen Umfeld längst kein Serienprodukt, sondern infolge wechselnder Projektinhalte vielfach Änderungen und Anpassungen unterworfen. Von den Hauptkomponenten Flugzeugzelle, Bodenkontrollstation und Avionik ist letztere besonders häufig von Änderungen betroffen, da neue Anwendungen zumeist mindestens Softwareanpassungen, häufig aber auch die Anbindung zusätzlicher Sensoren erfordern. Aus der Anwenderperspektive sind deshalb folgende Aspekte von größter Bedeutung:

1. **Erweiterbarkeit** um zusätzliche Ein- und Ausgänge zur flexiblen Anbindung von Nutzlasten.
2. **Zuverlässigkeit** wird mit steigendem monetärem Wert der Nutzlasten wichtiger.
3. **Unkomplizierte Programmierbarkeit** zur Erschließung eines interdisziplinären Nutzerkreises.
4. **Kompaktheit und Energieeffizienz** wirken direkt auf die Flugzeit bzw. Reichweite.

Der bewährte MINC Autopilot erfüllt diese Forderungen nur bedingt. Beispiele aus dem Automobilbau und der bemannten Luftfahrt zeigen jedoch eindrucksvoll, dass durch Verteilung der Systemfunktionen auf mehrere räumlich getrennte, an einem gemeinsamen Datenbus angeordnete Steuergeräte größere Flexibilität und leichtere Erweiterbarkeit des Gesamtsystems realisiert werden können. Auf diese Weise lässt sich die erstgenannte Forderung sowohl in Bezug auf System Ein- und Ausgänge, als auch Prozessorleistung erfüllen.

2 Avionik-Architektur

Der eingangs genannte MINC Autopilot soll für die folgenden Ausführungen als Beispiel für ein eher konventionelles, zentralisiertes Avioniksystem und als Vergleichsmaßstab dienen. Alle folgenden Aussagen sind jedoch überwiegend auch auf andere vergleichbare UAV-Autopilotensysteme, wie Paparazzi [4], PixHawk [5] und Andere [6, 7] übertragbar.

Der MINC Autopilot ist ein Zweiprozessor-System bestehend aus einem Mikrocontroller zur Datenerfassung, genannt TriMU und einem leistungsfähigeren Prozessor für die Berechnung von Navigation- und Flugregelungsfunktionen. Beide Prozessoren kommunizieren über eine bidirektionale serielle Datenverbindung. Obwohl das System, wie auch in Abb. 2 veranschaulicht, aus zwei kooperierenden Recheneinheiten besteht, kann es als beispielhaft für eine zentralisierte Architektur angesehen werden. Maßgeblich für diese Klassifizierung ist die Tatsache, dass keine expliziten Vorkehrungen zur flexiblen Erweiterung und Anpassung getroffen, sondern das System auf eine bestimmte Anwendung, namentlich die Demonstration der automatischen Bahnfolgeregelung, hin optimiert wurde.

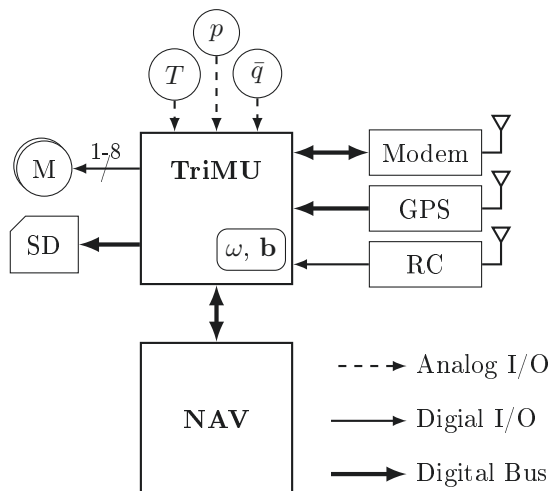


Abb. 2: Zentralisierte Architektur, MINC Autopilot

Das Abb. 2 zeigt außerdem die verfügbaren analogen und digitalen Ein- und Ausgänge der Datenerfassungseinheit TriMU. Dies sind im Einzelnen digitale Aktuatorausgänge (M) und Analogeingänge für Luftdaten, sowie ferner die Datenaufzeichnung (SD) und der Empfänger für die Funkfernsteuerung des Sicherheitspiloten (RC). Eine Besonderheit der TriMU ist die integrierte Inertialmesseinheit. Ein Funkmodem zum Datenaustausch mit einer Bodenstation, sowie ein GPS Empfänger komplettieren das System. Hervorzuheben ist, dass der Navigationsrechner (NAV) nicht mit Aufgaben der Datenerfassung betraut ist, sondern allein die hierarchisch höheren Funktionen

verwaltet. Im Gegenzug wird auf der TriMU folgerichtig ein Mikrocontroller eingesetzt, welcher über eine umfangreichere Ausstattung mit digitalen, sowie analogen Ein- und Ausgängen verfügt.

Eine wesentliche Einschränkung dieses konventionellen Systems besteht in der begrenzten Anzahl von Ein- und Ausgängen, wobei diese Begrenzung häufig nicht vom verwendeten Microcontroller, sondern von begrenzten Platz für Steckverbinder und Anschlüsse herrührt. Bei größeren Systemen, etwa in der bemannten Luftfahrt, kommt als zusätzlicher Nachteil der mit dem Funktionsumfang rapide wachsende Verkabelungsaufwand hinzu. Dieser ist bei den hier betrachteten, verhältnismäßig kleinen unbemannten Fluggeräten allerdings von untergeordneter Bedeutung.

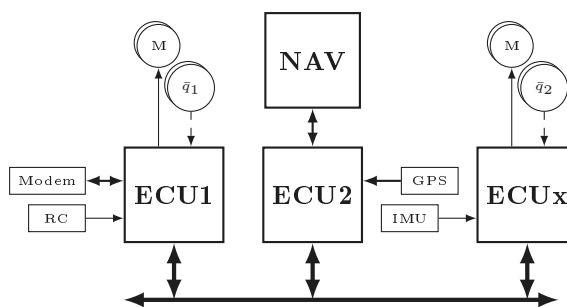


Abb. 3: Verteilte Architektur

Demgegenüber stellt das Abb. 3 ein verteiltes System in Linientopologie dar. Die einzelnen Steuergeräte (ECU) ähneln dabei, einschließlich der schematischen Darstellung von Sensoren, Aktuatoren und Peripheriegeräten bewusst der Datenerfassungseinheit aus Abb. 2, um zu verdeutlichen, dass die Knoten der verteilten Architektur grundsätzlich denselben Funktionsumfang abbilden können. Darüber hinaus verfügen sie jedoch mindestens über eine standardisierte Schnittstelle zum gemeinsamen Datenbus.

Offensichtlich ist diese von besonderer Kritikalität und muss infolgedessen gegebenenfalls redundant ausgelegt werden, um eine ausreichend hohe Zuverlässigkeit zu garantieren. Dieser Aspekt wurde bezogen auf das hier betrachtete Avioniksystem in [8] beleuchtet. Darüber hinaus generiert die größere Vielfalt von verschiedenen Steuergeräten, sowie die nebenläufige Natur eines verteilten Rechensystems neue Herausforderungen in Hinblick auf Programmierung, Systemintegration und Konfiguration. Während diese Aspekte in der bemannten Luftfahrt und dem Automobilbau nicht zuletzt durch stringente Prozesse und beachtlichen Ressourceneinsatz bereits vielfach beherrscht werden, können unbemannte Systeme ihre spezifischen Vorzüge, wie geringe Kosten und kurze Entwicklungszyklen, nur bewahren, wenn diese Komplexität auch mit begrenzten Mitteln kleiner akademischer Arbeitsgruppen beherrschbar bleibt.

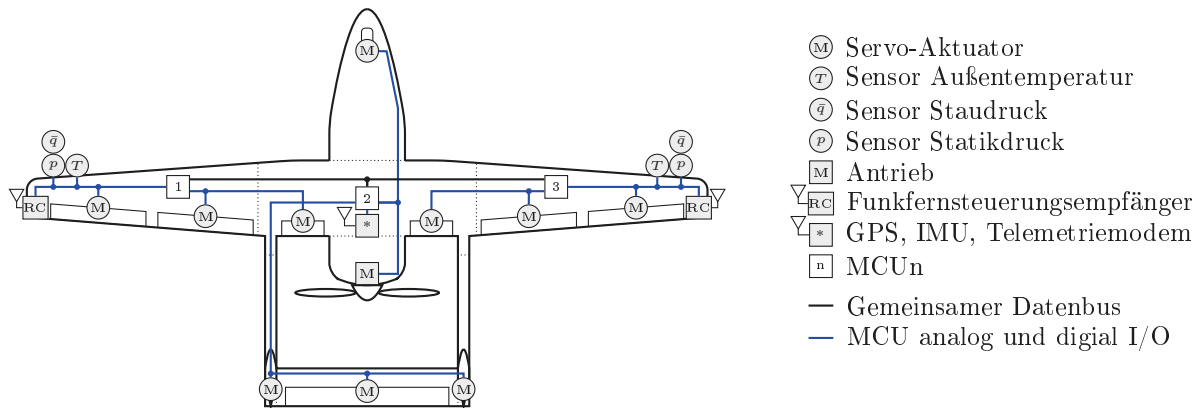


Abb. 4: Avionikkomponenten in Basiskonfiguration ohne Nutzlast am Beispiel des Carolo P360

Die Abb. 4 veranschaulicht eine solche, aus mehreren vernetzten Steuergeräten bestehende Architektur am Beispiel des als Kamera- und Instrumententräger für wissenschaftliche Anwendungen am Institut für Luft- und Raumfahrtssysteme der TU Braunschweig entwickelten Flugzeugs Carolo P360 [9], welches auch vom Institut für Flugführung in Forschung- und Lehre eingesetzt wird. Gezeigt ist eine Basiskonfiguration der Avionik ohne Nutzlast oder spezielle, projektbezogene Erweiterungen. Die Aufgaben der Avionik beschränken sich folglich auf die Ansteuerung der vielfältigen Steuerflächen und Antrieb, die Erfassung von Luftdaten und die Anbindung von Inertialmesseinheit, GPS-Empfänger, Telemetriemodem und Funkfernsteuerung des Sicherheitspiloten. Insgesamt sind zu diesem Zweck drei vernetzte Steuergeräte vorgesehen, die jeweils im linken und rechten Außenflügel, sowie dem Mittelflügel untergebracht sind.



Abb. 5: Carolo P360, Spannweite 3.6 m, Masse 25 kg

Viele der in Abb. 4 aufgeführten Komponenten sind kostengünstige und leicht verfügbare Zukaufteile aus dem Modellbaubereich. Hierzu zählen insbesondere auch die Funkfernsteuerungsempfänger, sowie die Servo-Aktuatoren und der Antriebsstrang, bestehend aus einem bürstenlosen Gleichstrommotor, zugehörigem Motorregler und den Batterien. Allen diesen Kom-

ponenten ist gemein, dass sie sich zwar vielfach im Einsatz bewährt und ihre Grundaufgabe hinreichend zuverlässig erfüllen, jedoch nur selten über Selbstdiagnosefunktionen, oder eine Überwachung des eigenen Systemzustands verfügen. Diese sind jedoch angesichts zunehmender Systemkomplexität unerlässlich, um die Funktionsfähigkeit aller Komponenten noch vor dem Flug am Boden sicherzustellen, oder auch Ausfälle im Flug zu erkennen und geeignete Maßnahmen einzuleiten. So weisen beispielsweise die verwendeten Servo-Aktuatoren weder über einen Überlastschutz auf, noch ist die Servoposition von außen zugänglich. Ähnliches gilt auch für die Bestandteile des Antriebsstrangs, bei dem besonders die Spannung der Batterie als Ganzes, sowie der einzelnen Zellen und auch die Leistungsaufnahme, Drehzahl und Temperatur des Motors von Interesse sind. Ohne die Realisierung derartiger Diagnosefunktionen detailliert zu beschreiben, lässt sich festhalten, dass hierzu das zugeordnete Steuergerät gegebenenfalls zusätzliche Ein- und Ausgabekanäle bereitstellen und in den allermeisten Fällen um zusätzliche Elektronik erweitert werden muss.

Die für einen sicheren automatischen Flug essentiellen Luftdatensensoren sind besonders durch Außenwirkung, wie Staub, Insekten und falsche Handhabung bedroht, sodass höhere Ausfallsicherheit am ehesten, wie in Abb. 4 gezeigt, durch eine redundante Ausführung und räumliche Trennung realisierbar ist. Die Dopplung der Funkempfänger an beiden Flügelspitzen soll hingegen insbesondere der Abschattung durch Kohlefasereinlagen in Rumpf und Flügeln entgegenwirken und damit jederzeit eine stabile Funkverbindung zum Sicherheitspiloten garantieren. Die Auswahl zwischen den beiden Empfängern erfolgt an Hand einer Plausibilitätsprüfung, sowie sofern vom Empfänger bereit gestellt, an Hand der Signalstärke. Auch hier sind gegenüber einer einfachen Ausführung wieder jeweils weitere analoge und digitale Eingabekanäle erforderlich, wie durch eine verteilte Architektur leicht bereitgestellt werden können.

3 Aufbau eines Steuergerätes

Während Abb. 2 und 3 das jeweilige Avioniksystem bewusst stark abstrahiert darstellen, werden einige Aspekte erst bei detaillierterer, hardware-naher Betrachtung eines einzelnen Steuergerätes offenbar. Hierzu ist es hilfreich zunächst die wesentlichen internen Komponenten eines Steuergerätes und im Anschluss gebräuchliche analoge und digitale Schnittstellen zur Anbindung von externen Sensoren und Aktuatoren genauer zu beschreiben, um den Gestaltungsspielraum beziehungsweise dessen Einschränkungen beim Systementwurf zu ermessen.

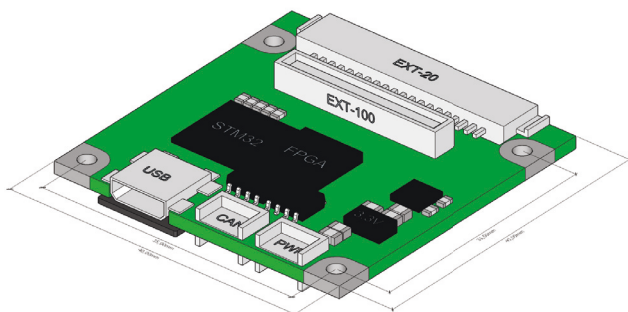


Abb. 6: Schematischer Aufbau der Hauptplatine eines Steuergerätes

Die Abb. 6 veranschaulicht den grundsätzlichen Aufbau der Hauptplatine eines Steuergerätes, wie es in Anlehnung an [8] für das hier vorgestellte Projekt vorgesehen ist. In der Abbildung sind bewusst nur die wesentlichen Komponenten gezeigt. Zentrale Elemente sind ein Mikrocontroller (STM32), sowie ein frei programmierbarer Logikbaustein (FPGA, Field Programmable Gate Array). Da es sich um ein Steuergerät für ein verteiltes Avioniksystem nach Abb. 3 handelt, sind Treiberbausteine zum Anschluss an einen gemeinsamen, zweifach redundanten Datenbus vorgesehen, wobei das Redundanzmanagement vom FPGA bewerkstelligt wird. Daneben sind auf der Leiterplatte Spannungswandler (3.3V) mit bis zu 6 W Ausgangsleistung zur Versorgung des gesamten Steuergerätes angeordnet, von welchen auch externe Sensoren und Aktuatoren versorgt werden können.

Als Mikrocontroller kommt ein STM32F4 mit 168 MHz Taktrate, 1024 kB Programm- und 192 kB Arbeitsspeicher und Gleitkommoprozessor (FPU, Floating-Point Unit) zum Einsatz. Bei der Auswahl des Mikrocontroller-Typs spielen neben den offensichtlichen technischen Eigenschaften, wie Prozessortakt, Speicher, digitale und analoge Schnittstellen, besonders auch Verfügbarkeit und Preis bei einschlägigen Elektronik-Distributoren, sowie die Unterstützung durch öffentlich zugängliche Entwicklungswerkzeuge und Compiler eine entscheidende

Rolle. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass Mikrocontroller dieser Serie vielfach in ähnlichen Projekten verwendet werden [4, 5, 6].

Komplettiert wird dieses Basissystem durch eine Speicherkarte als nicht-flüchtiger Massenspeicher für Mess- und Diagnosedaten, sowie einen USB-Anschluss als Programmierschnittstelle.

Diverse Steckverbinder stellen, wie in Abb. 3 angedeutet, die physikalische Verbindung zu externen Komponenten, wie Sensoren, Aktuatoren, Funkmodems und GPS-Empfängern, sowie dem gemeinsamen Datenbus und zur Versorgungsspannung her. Da die Steckverbinder aus Gründen der Zugänglichkeit typischerweise am Rand der Leiterplatte angeordnet werden, ist die Anzahl der herausführbaren Signale ein limitierender Faktor, insbesondere wenn möglichst kleine äußere Abmessungen, wie hier von 40 mm × 40 mm Grundfläche, angestrebt werden. Aus diesem Grund ist zusätzlich zum dem am Rand der Leiterplatte angeordneten Stecker mit 20 analogen und digitalen Signalen (EXT-20) ein mit 100 Signalleitungen wesentlich dichter bestückter, stabiler Steckverbinder (EXT-100) vorgesehen, über welchen zusätzliche Peripherieplatinen angeschlossen werden sollen.

Während in Abb. 6 zwar Steckverbinder für analoge und digitale Signale gezeigt sind, fehlen jedoch Komponenten zur Signalkonditionierung und -filterung. Tatsächlich sollen diese vielfältigen und stark anwendungsspezifischen Komponenten - mit wenigen Ausnahmen - bewusst nicht auf der gezeigten Hauptplatine, sondern auf austauschbaren Erweiterungsplatinen angeordnet werden, die über die Anschlüsse EXT-20 und/oder EXT-100 angeschlossen werden. Diese Modularisierung erlaubt einerseits eine optimale Anpassung der Zusatzbeschaltung an die jeweilige Anwendung und gestattet es andererseits diese vergleichsweise kostengünstigen Erweiterungsplatinen gegebenenfalls wieder auszutauschen. Die im Vergleich teurere Hauptplatine bleibt abgesehen vom Programmcode unverändert. Die folgenden Abschnitte umreißen kurz die verfügbaren analogen und digitalen Schnittstellen dar und erläutern an Hand ihrer Eigenschaften, warum diese Modularisierung gewählt wurde.

3.1 Digitale Schnittstellen

Digitale Schnittstellen werden vielfach bevorzugt, denn sie sind im Allgemeinen vergleichsweise unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störungen und ihre binären Zustände sind in integrierten Schaltkreisen leicht zu verarbeiten [10].

Die größte Vielfalt weisen digitale Schnittstellen in der Art und Weise auf, wie die binären Signale interpretiert und verarbeitet werden, sowie in der Anzahl

benötigter Leitungen und erreichbarer Datenrate. Der Mikrocontroller stellt hierzu eine ganze Reihe von softwareseitig parametrisierbaren Funktionsblöcken bereit, welche die Nutzung durch Benutzersoftware erleichtern. Die folgende Aufstellung charakterisiert die verfügbaren Schnittstellen knapp und ordnet wo möglich typische Anwendungsfälle zu:

- **Allg. Eingangs- und Schaltkanäle (GPIO):** zum Erfassen von diskreten Zuständen, wie Anschlagsschaltern oder zusammen mit einem Leistungstreiber zum Schalten von Lasten.
- **Puls-Frequenz-Modulation (PFM):** Kodierung von Information durch die Anzahl von Impulsen je Zeiteinheit, beispielsweise zur Erfassung der Propellerdrehzahl mittels Inkrementalgeber.
- **Puls-Weiten-Modulation (PWM):** Information wird durch die Pulslänge kodiert. Es ist der De-facto-Standard zur Ansteuerung von Modellbauservoaktuatoren.
- **Asynchrone Serielle Schnittstelle (UART):** Übertragung auf getrennten Sende- und Empfangsleitungen mit fester Baudrate. Häufig von komplexeren, teilweise unabhängig agierenden Peripheriegeräten, wie Funkmodems und GPS-Empfängern verwendet.
- **Local Interconnect Network (LIN):** im Automobilbau weit verbreitetes, UART-basiertes Protokoll für einfache, kostengünstige Sensoren und Aktuatoren, das allerdings mit einer kombinierten Sende- und Empfangsleitung arbeitet.
- **1-Wire:** Schnittstelle für einfache Sensoren mit geringem Datenvolumen und Abtastrate, bei der eine gemeinsame Spannungsversorgungs- und Signalleitung verwendet wird.
- **Inter-Integrated Circuit (I²C):** kommt allein mit Takt- und Datenleitung, aus und ist weit verbreitet für einfache Sensoren, Analog-Digital-Wandler und nicht-flüchtige Speicher. Aufgrund fester Adressen ist der Betrieb mehrerer gleichartiger Bauteile an einem Bus oft problematisch.
- **Serial Peripheral Interface (SPI):** Datenübertragung auf Sende- und Empfangsleitung synchron zum Taktsignal des Busmasters, der jeweils nur genau ein Peripheriegerät über eine dedizierte Leitung auswählt. Häufig verwendet bei Sensoren mit hoher Abtastrate, wie der Inertialmesseinheit.

Allerdings sind diesen Funktionsblöcken häufig bestimmte Ein- und Ausgänge (Pins) des Mikrocontrollers zugeordnet, sodass beim Platinenentwurf eine statische Zuordnung erfolgen muss. Hier schafft das auf der Hauptplatine platzierte FPGA Abhilfe, indem vom Redundanzmanagement noch ungenutzte

Ressourcen zur Implementierung einiger der aufgeführten Funktionsblöcke benutzt werden, wodurch die Pin-Zuordnung auch später noch in weiten Grenzen veränderbar ist.

Auf der untersten, physikalischen Ebene sind digitale Logikschnittstellen primär durch die Schaltschwellen der binären Zustände und eine Mindestflankenteilheit definiert, sodass nur Bauteile bei denen diese über den gesamten Betriebstemperaturbereich und unter Einbeziehung unausweichlicher Bauteilvariation kompatibel sind, zuverlässig zusammen betrieben werden können. Zur Verknüpfung inkompatibler Elemente stehen eine Vielzahl von diskreten und integrierten Lösungen zur Verfügung. Problematisch sind in diesem Zusammenhang nicht Verfügbarkeit oder Preis geeigneter Schaltkreise, sondern die Vielzahl möglicher Paarungen, die einer generalisierte Lösung entgegen stehen und es zweckmäßiger erscheinen lassen, Anpassungen außerhalb der Hauptplatine zu realisieren. Ähnliches gilt eingeschränkt auch für einfache, rein passive Komponenten, wie Pull-Up/Down und Abschlusswiderstände, oder auch Ferrite zur Störunterdrückung.

3.2 Analoge Schnittstellen

In einigen Fällen verfügen Sensoren und Aktuatoren nicht über eine digitale Schnittstelle und die zu erfassenden Signale liegen in Form von elektrischer Spannung oder Strom vor, beziehungsweise es müssen derartige Signale als Ausgabe erzeugt werden. Hierzu sind in der Regel Schaltungen aus Operationsverstärkern und passiven Komponenten, wie Widerständen und Kondensatoren notwendig. Die große Vielfalt in Bezug auf Bandbreite, Ein-/Ausgangsspannung und -leistung macht die Integration von flexibel konfigurierbaren analogen Funktionsblöcken aus diesen Grundbausteinen im Vergleich zu digitalen Interfaces kostspielig. Im verwendeten Mikrocontroller ist deshalb einzig ein mehrkanaliger Analog-Digital-Wandler mit eher durchschnittlichen Leistungsdaten enthalten, wobei meist eine Skalierung und Filterung der Eingangssignale notwendig bleibt. Ein Vorzug der integrierten Wandler ist jedoch die direkte Anbindung an den internen Speicher, die hohe Abtastraten ermöglicht.

Zwar existieren am Markt Operationsverstärker mit programmierbarer Verstärkung (Programmable Gain Amplifier, GPA), sowie programmierbare Widerstände und Kapazitäten, aus denen sich in bestimmten Grenzen nachträglich programmierbare analoge Funktionsblöcke zur Signalfilterung und -konditionierung realisieren lassen. Diese unterliegen jedoch in der Regel gegenüber konventionellen, statischen Aufbauten engen Beschränkungen hinsichtlich umsetzbarer elektrischer Leistung, Betriebsspannung und Bandbreite.

Außerdem beanspruchen sie in der Regel mehr Platinenfläche und sind wesentlich teurer als vergleichbare statische Lösungen. Einen Ausweg versprechen hochgradig integrierte programmierbare analoge Schaltkreise (FPAA, Field Programmable Analog Array) ähnlich den für die digitale Domäne etablierten FPGA. Diese FPAA sind seit einigen Jahren in der Entwicklung [11], werden jedoch nur von wenigen Herstellern vertrieben. Folglich bleibt die Konditionierung analoger Signale statischen, der jeweilige Aufgabe angepassten Schaltungen aus Operationsverstärkern und passiven Komponenten überlassen, die abgesehen von den internen Wandlern des Mikrocontrollers nicht sinnvoll auf der Hauptplatine integrierbar sind.

4 Erweiterungsplatinen

Geht man davon aus, dass je nach konkreter Anwendung insbesondere für alle analogen und in begrenztem Maße auch für einige digitale Schnittstellen zusätzliche Schaltungen zur Signalkonditionierung und -filterung, beziehungsweise Pegelanpassung notwendig sind, stellt sich die Frage, ob diese Schaltungen in die teure Hauptplatine des Steuergeräts (siehe Abb. 6) integriert, oder auf zusätzliche Platinen ausgelagert werden sollen.

Besonders einfache, häufig benötigte Schaltungen aus wenigen kleinen Komponenten, wie beispielsweise Spannungsteiler, Pull-Up/Down Widerstände und einfache passive Filter, lassen sich noch vergleichsweise leicht auf der Hauptplatine vorbereiten, indem entsprechende Leiterbahnen und Lötbrücken nebst noch unbestückter Löt pads beim Platinenentwurf angelegt werden. Erst im Bedarfsfall werden dann passende Komponenten nachträglich aufgelötet und im Zuge dessen die Steuergeräteplatine dauerhaft auf die spezielle Aufgabe angepasst. Vorteil dieses Ansatzes sind die geringen Kosten, die sich neben dem Aufwand zur manuellen Bestückung im Wesentlichen auf die Beschaffung der Komponenten beschränken. Insbesondere bei kurzlebigen experimentellen Aufbauten, erweist es sich jedoch als Nachteil, dass die betreffende Steuergeräteplatine nur durch erneute Lötarbeiten wieder in den Ausgangszustand zurück versetzt werden kann, also im Allgemeinen nur begrenzt in anderer Konfiguration wiederverwendbar ist.

Eine Alternative, welche die dauerhafte Modifikationen der Hauptplatine vermeidet besteht in der Auslagerung aller Zusatzbeschaltungen auf anwendungsspezifische Erweiterungsplatinen. In diesem Fall kommt zu den Kosten für die notwendigen Komponenten noch der Entwurfs- und Fertigungsaufwand für eine entsprechende Erweiterungsplatinen hinzu. Dieser Nachteil relativiert sich jedoch, da einerseits viele Sensoren und Module ohnehin zur sicheren mechanischen Fixierung auf einer Leiterplatte angebracht werden müssen und

andererseits die Erweiterungsplatine Raum für komplexere Schaltungen und Funktionen bietet, die auf der Hauptplatine nicht realisierbar wären.

4.1 Konstruktive Anordnung

Die mechanische und elektrische Verbindung zwischen der Hauptplatine des Steuergeräts und den Zusatzplatinen bleibt jedoch kritisch. Einerseits muss eine stabile mechanische Verbindung bei kompakten äußere Abmessungen und andererseits kurze, störungsfreie elektrische Signalwege realisiert werden. Letzteres schließt längere Kabelverbindungen zwischen Erweiterungs- und Hauptplatine aus, zumal diese immer auch einen erhöhten Konfektionierungsaufwand implizieren.

Die favorisierte Lösung, welche sowohl eine kompakte Bauform, als auch sichere elektrische Kontaktierung verspricht, macht Gebrauch von den schon in Abb. 6 gezeigten stabelbaren Steckverbindern auf Ober- und Unterseite der Hauptplatine und ist in Abb. 7 beispielhaft für zwei zusätzliche Erweiterungsplatinen dargestellt. Exemplarisch sind auf der Oberseite ein GPS-Modul mit integrierter Antenne und auf der Unterseite ein Servo-Aktuator-Modul gezeigt. Durch Anbringung von Stapelsteckern auch auf Ober- und Unterseite der Erweiterungskarten sind auch mehr als die gezeigten zwei Erweiterungsplatinen übereinander anordenbar. Beim GPS-Modul entfällt der oberseitige Stapelstecker aus offensichtlichen Gründen, während das Servo-Modul auch zwischen GPS- und Hauptplatine angeordnet werden kann.

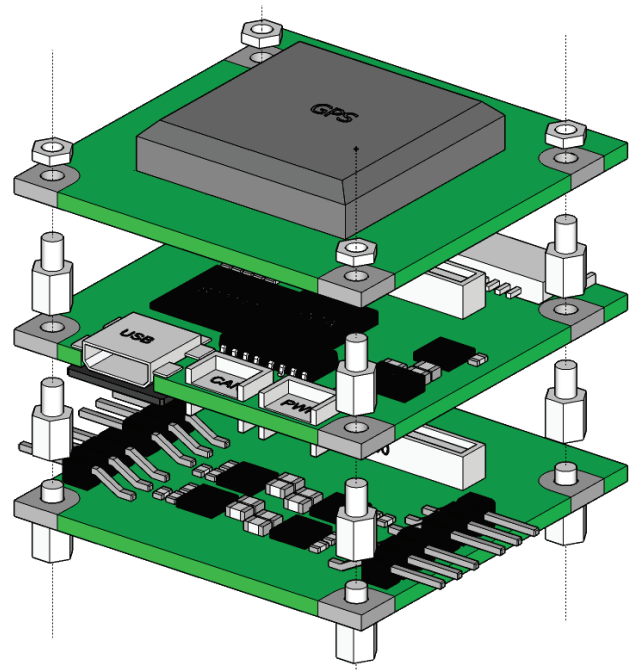


Abb. 7: Stapelanordnung von Erweiterungsplatinen. Platinenabstand 4 mm nach Zusammenbau.

Der Abstand zwischen den Platinen wird durch die Stabelstecker vorgegeben und beträgt im zusammengebauten Zustand 4 mm. Dieser Abstand ist ein Kompromiss, denn er lässt angemessenen Bauraum für typische SMD Bauteile, während ein Stapel aus einer Haupt- und zwei Erweiterungsplatinen dennoch weniger als 20 mm hoch ist und damit immer noch, wie in Abb. 4 gezeigt, im Flügel des P360 untergebracht werden kann. Die mechanische Verbindung zwischen den Platinen wird über vier Gewindestifte hergestellt.

4.2 Elektrische Schnittstelle

Während die Anordnung und Größe der Befestigungsbohrungen, sowie die Lage und Höhe der ober- und unterseitigen stabelbaren Steckverbinder die mechanische Schnittstelle zwischen den einzelnen Platinen des Steuergerätes definieren, legt die Zuordnung von Funktionen zu bestimmten Signalpins, oder auch Signalen, des Stabelsteckers die elektrische Schnittstelle fest. Grundsätzlich sollen mehrere Erweiterungsplatinen in beliebigen Kombinationen gemeinsam von einer Hauptplatine genutzt werden können. Damit dies möglich ist, müssen die einzelnen Erweiterungsplatinen derart gestaltet sein, dass sie allein mit einer Hauptplatine funktionsfähig sind und andere Module nicht beeinflussen. Ein direkter Datenaustausch zwischen Erweiterungsplatinen ohne Mitwirkung des Hauptmoduls schließt sich unter diesen Randbedingungen aus. Als Konsequenz dieser Abstraktion ist es zweckmäßig alle über die stabelbaren Steckverbinder laufenden Singalleitungen zunächst als von den Erweiterungsmodulen gemeinsam genutzte Ressource zu betrachten. Der Zugriff auf diese so zu organisieren, dass es nicht zu Zugriffskonflikten kommt.

Die genannten Randbedingungen lassen sich einfach und zuverlässig lösen, wenn zu jedem Zeitpunkt nur genau eine Erweiterungsplatine von der Hauptplatine exklusiven Zugriff auf die gemeinsam genutzten Signalleitungen erhält und alle übrigen Erweiterungsmodule derweil passiv geschaltet werden. Dieses Vorgehen ist von diversen Bussystemen, wie RS-485 bekannt, setzt jedoch ein kooperatives Verhalten aller Module voraus. Außerdem beschränkt es offenbar die Nebenläufigkeit, da immer nur das gerade selektierte Erweiterungsmodul zum Datenaustausch berechtigt ist, während alle übrigen warten müssen, bis die Hauptplatine sie in einem festen Zyklus abfragt.

Während die meisten analogen und digitalen Sensoren, sowie Modellbau-Servoaktuatoren und Motorregler mit dem implizierten Round-Robin Verfahren kompatibel sind, ist dies mit weitgehend selbständig operierenden Peripheriegeräten, wie beispielsweise Funkmodems anders. Diese Geräte gehen im Allgemeinen davon aus, dass sie jederzeit selbständig einen Datenaustausch, zum Beispiel über die Sendeleitung einer

serielle Schnittstelle, einleiten können. Ist dies nicht der Fall, gehen unter Umständen Daten verloren. Um dies zu verhindern wird ein hybrider Ansatz gewählt, der jeder Erweiterungsplatine eine begrenzte Anzahl von digitalen Signalleitungen zur dauerhaften exklusiven Nutzung zuweist. Diesen laufen üblicherweise im FPGA auf geeignete Funktionsblöcke.

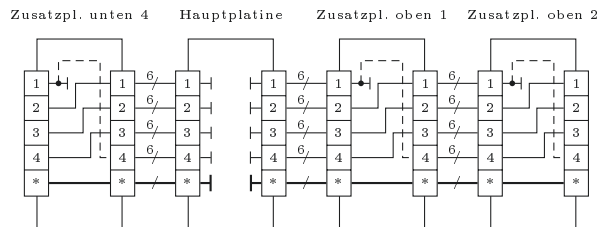


Abb. 8: Führung exklusiver und gemeinsamer Signalleitungen

Die Abb. 8 veranschaulicht an Hand einer Hauptplatine und dreier Erweiterungsmodulen, wie durch statische Signalführung zwischen oberem und unterem Verbindungsstecker aller Erweiterungsplatinen die Weierleitung der exklusiv zugeordneten Signale erfolgt. In einem Querbalken endende Signale werden auf der Platine verarbeitet. Die logische Position eines Erweiterungsmoduls ergibt dabei aus Sicht der Hauptplatine allein aus seiner Position im Stapel und wird bei der Programmierung berücksichtigt. Wenn auch die gestrichelt gezeichneten Verbindungen vorhanden sind, können die Module unverändert wahlweise oberhalb und unterhalb der Hauptplatine platziert werden. Je vier Erweiterungsmodulen auf der Ober- und Unterseite sind getrennt voneinander selektierbar. Im Übrigen ist es auch zulässig zwei oder mehrere Zusatzkarten zeitgleich zu aktivieren und abzufragen, sofern sie keine gemeinsam genutzten Signalleitungen aufweisen.

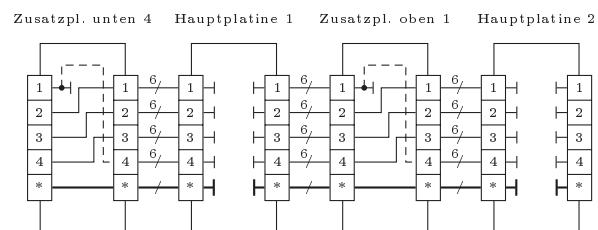


Abb. 9: Führung exklusiver und gemeinsamer Signalleitungen

Darüber hinaus ergibt sich aus auch die Möglichkeit als Backup, oder zur Erhöhung der Rechenleistung zwei Hauptplatinen in einem Stapel zu betreiben, wie es Abb. 9 zeigt. Hierbei können dann von beiden Prozessoreinheiten die zwischen ihnen liegenden Erweiterungsplatinen genutzt werden, wobei allerdings im Allgemeinen wiederum kein zeitgleicher Zugriff möglich ist.

5 Zusammenfassung

Im diesem Beitrag wurden zunächst die Vorteile einer aus mehreren vernetzten Steuergeräten aufgebauten Avionikarchitektur gegenüber einem eher zentralisierten Aufbau allgemein dargestellt, wobei der vielfach bewährte MINC Autopilot als Referenz diente. Anschließend wurde am Beispiel eines vergleichsweise großen und komplexen Flächenflugzeugs, dem Carolo P360, gezeigt, wie eine solche verteilte Avionik für die Basisaufgabe des automatischen Bahnfolgeflugs aussehen kann, ohne jedoch auf die Anbindung spezieller Nutzlasten im Detail einzugehen. Es zeigt sich, dass die vorgeschlagene Anordnung von Steuergeräten eine optimierte Platzierung von kritischen Komponenten, wie Funkempfängern und Luftdatensensoren begünstigt. Darüber hinaus können kritische Sensoren und Komponenten leicht mehrfach und räumlich getrennt in die Avionik integriert werden und so gestiegenen Anforderungen an die Ausfallsicherheit des Gesamtsystems entsprochen werden.

Der Hauptteil widmete sich dem Aufbau eines einzelnen Steuergerätes. Hierbei zeigte sich, dass die eingangs aufgestellte Forderung nach Flexibilität und Adaptierbarkeit nur realisierbar ist, wenn auch das einzelne Steuergerät leicht den unterschiedlichen Anforderungen angepasst werden kann. Dies gilt umso mehr im Kontext von Forschung und Lehre, wo häufige Änderungen die Regel sind.

Die Umsetzung in einem einzelnen Steuergerätestwurf ist jedoch schwierig, da häufig zusätzliche, stark anwendungsspezifische elektronische Schaltungen notwendig sind, um die vielfältigen Sensoren, Aktuatoren und Teilsysteme anzubinden. Aus diesem Grund wird sich ein modulares, adaptierbares Steuergerät im Allgemeinen aus einer Hauptplatine und mehreren anwendungsspezifischen Zusatzplatinen zusammensetzen, die mechanisch kompakt und elektrisch zuverlässig verbunden werden müssen. Die abschließend dargestellten Entwürfe berücksichtigen diesen Umstand, um ein kompaktes Baukastensystem, bestehend aus einer leistungsfähigen Basiseinheit aus Mikrocontroller, FPGA und Datenbusanbindung, sowie flexibel austauschbaren, kostengünstigen Erweiterungsmodulen zu schaffen. Damit diese Erweiterungsmodule tatsächlich weitgehend frei kombinierbar sind, muss auch die elektrische Schnittstelle zwischen Basis- und Erweiterungsplatinen genauer spezifiziert werden. Ein hybrider Ansatz aus wenigen, den Zusatzmodulen exklusiv zugeordneten und im vielen gemeinsam genutzten Signalleitungen, stellt einen Kompromiss zwischen Leistungsfähigkeit und Komplexität dar.

Literatur

- [1] T. Krüger u. a. „Ergebnisse des ANDROMEDA-Projektes - Automatische Luftbildgewinnung mit Unbemannten Kleinflugzeugen“. In: *German Aeronautics and Astronautics Congress*. ISBN:978-3-932182-68-5, PaperID 161314. DGLR. Hamburg, Germany, Sep. 2010.
- [2] S. Martin, J. Bange und F. Beyrich. „Meteorological profiling of the lower troposphere using the research UAV "M2AV Carolo"“. In: *Atmos. Meas. Tech.* 4 (2011), S. 705–716.
- [3] A. van den Kroonenberg u. a. „Spatially-Averaged Temperature Structure Parameter Over a Heterogeneous Surface Measured by an Unmanned Aerial Vehicle“. In: *Boundary-Layer Meteorology* 142 (2012), S. 55–77.
- [4] The Paparazzi Project. URL: <http://wiki.paparazziuav.org>.
- [5] PX4 Autopilot. URL: <http://pixhawk.org>.
- [6] OpenPilot. URL: <http://www.openpilot.org>.
- [7] APM Autopilot Suite. URL: <http://ardupilot.com>.
- [8] A. Krüger. „Ein verteiltes UAS Autopilotensystem für Forschung und Lehre“. In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*. Stuttgart, 2013.
- [9] A. Scholtz u. a. „Development of a New Multi-Purpose UAS for Scientific Applications“. In: *International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g)*. Zürich, Sep. 2011.
- [10] Friedrich Wittgruber. *Digitale Schnittstellen und Bussysteme*. 2. Aufl. Springer, 2002.
- [11] R. Timothy Edwards u. a. „Analog Module Architecture for Space-Qualified Field-Programmable Mixed-Signal Arrays“. In: 1999.