

## KURZFASSUNG DER DIPLOMARBEIT ENTWICKLUNG UND ERPROBUNG EINES AUTOPILOTEN MIT INERTIALER MESSEINHEIT

A. Dei, Hochschule Bremen, Neustadtswall 30, 28199 Bremen, Deutschland

### Zusammenfassung

An der Hochschule Bremen wurden in den letzten Jahren Autopiloten aufgebaut und erprobt um Mikrofluggeräte automatisch zu betreiben, die mit einem Infrarot-Lagemesssystem ausgestattet waren. Das leichteste Fluggerät hatte eine Abflugmasse von 195g, eine Spannweite von 40cm und erreichte auf einem internationalen Wettbewerb anlässlich der EMAV08 eine zweite Platzierung. Bei der Erprobung stellte sich heraus, dass es in Norddeutschland oft Wetterlagen gibt, bei denen das Lagemesssystem über Temperaturdifferenzmessungen mit Infrarotsensoren nicht zuverlässig funktioniert. Weiter wurden Prototypen von Autopiloten für Schwebefluggeräte entwickelt, die durch Einsatz von mikroelektronischen Drehraten- und Beschleunigungssensoren eine Lagebestimmung durchführen. Diese Prototypen sind für den Einsatz in Mikrofluggeräten zu groß und zu schwer.

Um beide genannten Probleme zu lösen, beschreibt die Diplomarbeit die Entwicklung, den Aufbau und die Inbetriebnahme einer miniaturvisierten inertialen Messeinheit (kurz IMU Inertial Measurement Unit), sowie eines neuen Autopiloten für den Einsatz in Miniatur Schweb- und Flächenfluggeräten. Die Eignung des Autopiloten und der erstellten Software wird durch Anwendung in einem neu entwickelten Quadropters praktisch nachgewiesen. Insgesamt entsteht die vollständige Instrumentierung und die Integration der Systeme zum automatisierten Schwebeflug wie Lagemesssystem, Autopilot, manuelle Fernsteuerung, Bidirektionale Telemetrie Einrichtung, Stromversorgung, Motorensteller, Antriebe, Tragwerk und GPS.

Es wird eine Abwägung durchgeführt um den geeigneten Mikrokontroller-Signalprozessor für den Autopiloten auszuwählen. Die Entscheidung fällt auf einen ARM7-Mikrokontroller, wobei durch die Verwendung von drei Analog-Digital-Umsetzern mit 16 Eingängen bei 16-Bit-Auflösung und einem Eingang mit 24-Bit-Auflösung für die Höhenmessung Anschlüsse des 32-Bit Mikrocontrollers LPC2148 für weitere Aufgaben genutzt werden. So sind gegenüber der bisherigen Lösung zusätzliche JTAG-, I2C- und SPI-Schnittstellen nutzbar. Diese Schnittstellen können in Zukunft für Rechnerkopplungen und zusätzliche Sensoren der Flugmission genutzt werden.

Um die Entwicklungsziele des neuen Autopiloten zu erreichen wird eine Marktanalyse von Drehraten-, Beschleunigungs-, Luftdruck- Differenzdruck-, Magnet- und Temperatursensoren durchgeführt und besonders geeignete Sensoren ausgewählt. Bei den Beschleunigungssensoren können unterschiedliche Sensoren bezüglich Achsenzahl und Messbereich bestückt werden, um verschiedenen Anforderungen zu erfüllen.

Da viele moderne MEMS-Sensoren nicht von Hand verlötet werden können, da es sich um pinlose Gehäuse handelt, wird ein Verfahren entwickelt und erprobt, sie unter Laborbedingungen zu verlöten. Somit gelingt die Herstellung der Prototypen ohne Fremdhilfe oder Einschaltung eines Bestückungsunternehmens.

Bei der Anordnung der Sensoren und des Mikrocontrollers wird eine Realisierung auf zwei getrennten Leiterplatten gewählt um die Funktionen Messen und Verarbeiten räumlich zu trennen. Durch die Nutzung des SPI-Busses sind nur wenige Verbindungen zur Kommunikation zwischen den beiden Leiterplatten nötig. Es werden Treiberprogramme für die neue Hardware entwickelt und getestet und Ausrüstungen und Verfahren erdacht, um die Sensoren zu kalibrieren. Weiter werden bestehende Steuer- und Regelprogramme für den automatischen Flug des neu aufgebauten Quadropters angepasst sowie die Teilsysteme zu einem Fluggerät mechanisch und elektrisch integriert. Die Eignung der Entwicklungen wird durch Demonstrationsflüge nachgewiesen.

# 1 Einleitung

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme einer miniaturisierten inertialen Messeinheit, kurz IMU (Inertial Measurement Unit), in Verbindung mit einem Autopiloten für den Einsatz auf Miniatur Schweb- und Flächenfluggeräten.

Die Aufgabe einer IMU ist es, jederzeit ihre Lage und damit auch die Lage des Fluggeräts im Raum bestimmen zu können. Um diese Aufgabe erfüllen zu können sind mehrere verschiedene Sensorsysteme erforderlich, welche eine Reihe von Informationen liefern.

Zu den für die Lageerkennung unerlässlichen Informationen gehören die Drehgeschwindigkeit um alle drei Achsen des Fluggeräts, eine Erfassung der wirkenden Beschleunigungskräfte, die unter anderem zur Berechnung der Neigungswinkel des Fluggeräts verwendet werden. Die Erfassung der Drehgeschwindigkeiten erfolgt über Gyroskope, welche inzwischen als MEMS (Mikro-Elektrisch-Mechanisches System) erhältlich sind, was den Aufbau einer miniaturisierten IMU erst möglich macht. So besitzen herkömmlich mechanische Gyroskope durchaus Abmessungen von 20x20x20cm, ein MEMS Gyroskop dagegen kommt mit 7x7x4mm aus. Auch zur Messung von Beschleunigungen sind inzwischen MEMS Sensoren erhältlich, die die Messung im miniaturisierten Maßstab ermöglichen. Eine alternative für Gyroskope und Beschleunigungssensoren stellen mehrere Infrarotsensoren dar, welche die Umgebungstemperatur rund um das Fluggerät messen. So stellt sich der Himmel als sehr kalt, der Erdboden als warm dar. Aus diesen Temperaturdifferenzen zwischen Himmel und Erdboden lässt sich die Lage berechnen. Die Lageerfassung über Infrarotsensoren birgt jedoch eine Anzahl von Nachteilen. So funktionieren sie nur außerhalb von Gebäuden und mit Abstand zu großen Flächen welche eine Wärmestrahlung aufweisen. Ebenso verfälscht diesige Luft und auch nahe Waldgebiete das Messergebnis. Dazu ist diese Art der Sensorik sehr langsam und daher nur für Flächenfluggeräte geeignet, jedoch nicht für dynamisch fliegende Schwebefluggeräte.

Ein elektronischer Kompass ermöglicht bei Schwebefluggeräten einen Ausgleich von Rotationen um die Z-Achse, die sich durch Driftfehler der Gyroskope ergeben. In der Z-Achse gibt es im Gegensatz zu der waagerechten Position, wo aus der Erdbeschleunigung berechnete Winkel als Referenz dienen, keine Referenz. Diese nötige Referenz bildet der Kompass.

Elektronische Kompassse bestehen aus hochempfindlichen, auf magnetische Felder empfindliche, Sensoren, welche in allen drei Achsen das sie umgebende Magnetfeld messen. Zwar

würde für die Kompassfunktion ein zweiachsiges Sensorsystem ausreichen, jedoch wäre dieses dann neigungsempfindlich, was bei Fluggeräten zu vermeiden ist. Es erfolgt daher die Messung aller drei Achsen.

Für eine Positionsbestimmung ist ein GPS System die erste Wahl, lassen sich doch an jedem Punkt der Erde innerhalb kurzer Zeit die Koordinaten ermitteln an denen man sich befindet. Für Mikrofluggeräte ist jedoch die Genauigkeit ein Problem, denn ein GPS System hat einen relativ großen Fehler von typisch 5m bei freier Fläche und bis zu 30m in Stadtgebieten, hinzu kommt ein Auswandern der Position. Ein Schweben an einem festen Punkt ist daher schwierig. Abhilfe schafft hier ein Differenz-GPS, wo mit Hilfe eines zweiten, ortsfesten GPS Empfängers, die Genauigkeit und Stabilität um ein vielfaches verbessert werden kann.

Das GPS System bietet auch die Möglichkeit, Informationen über die aktuelle Höhe zu erhalten, jedoch sind diese Informationen noch ungenauer als die Positionsdaten. Der typische Fehler beträgt etwa 15m, so dass eine zuverlässige Höhenregelung, welche für autonome Flüge zwingend erforderlich ist, kaum möglich ist. Eine genauere und schnellere Methode ist es hier den Luftdruck zu messen. Dieser sinkt mit zunehmender Höhe ab. Heutige MEMS Luftdrucksensoren besitzen eine so hohe Auflösung, dass in Verbindung mit hochauflösenden Analog-Digital-Umsetzern Höhenunterschiede von wenigen Zentimetern erfasst werden können.

Der Autopilot ist die eigentliche Intelligenz des Systems, er beinhaltet den Mikrocontroller, der die von der IMU gelieferten Daten erhält, sie verrechnet und die Motoren bzw. Steuerelemente ansteuert.

## 2 Aufgabenstellung

Aufgabenstellung Diplomarbeit Herr Andreas Dei  
Matr. Nummer 146792

### Entwicklung und Erprobung eines Autopiloten mit inertialer Messeinheit

An der Hochschule Bremen wurden in den letzten Jahren Autopiloten aufgebaut und erprobt um Mikrofluggeräte autonom zu betreiben, die mit einem Infrarot- Lagemesssystem ausgestattet waren. Das leichteste Fluggerät hatte eine Abflugmasse von 195g, eine Spannweite von 40cm und erreichte auf einem internationalen Wettbewerb anlässlich der EMAV08 eine zweite Platzierung. Bei der Erprobung stellte sich heraus, dass es in Norddeutschland oft Wetterlagen gibt, bei denen das Lagemesssystem über Temperaturdifferenzmessungen nicht zuverlässig funktioniert. Weiter wurden Prototypen von Autopiloten für Schwebefluggeräte entwickelt,

die durch Einsatz von mikroelektronischen Drehraten- und Beschleunigungssensoren eine Lagebestimmung durchführen. Diese Prototypen sind für den Einsatz in Mikrofluggeräten zu groß und zu schwer. Herr Dei erhält im Rahmen seiner Diplomarbeit die Aufgabe, einen universellen Autopiloten zu entwickeln und zu erproben, der mit MEMS-Sensoren für die Lage- und Höherfassung bestückt ist. Dieser soll sowohl für Mikroflächenflugzeuge als auch für Schwebefluggeräte geeignet sein.

Im Einzelnen sind folgenden Aufgaben zu leisten:

- Marktanalyse und technische Bewertung verfügbarer MEMS-Sensoren
- Entwicklung einer Leiterplatte für Sensoren zur Realisierung einer universellen inertialen Messeinheit mit SPI-Schnittstelle
- Erarbeitung und Dokumentation einer Technologie, um im Laborbetrieb die verwendeten Sensoren zu verlöten
- Neuentwicklung einer universellen Rechnerleiterplatte mit 32-Bit ARM7 Mikrocontroller zum Betrieb mit der neuentwickelten Sensorenleiterplatte als auch mit den bisher eingesetzten Infrarotsensoren
- Anpassung und Test von Treiberprogrammen
- Kalibrierung der Messeinheit
- Aufbau und Erprobung eines Quadropters, Integration der neuentwickelten Elektronik

Für die Durchführung dieser Arbeiten stehen Herrn Dei die folgenden Hilfsmittel zu Verfügung:

- Regelungs-, Filter- und Steuerungsprogramme eines neuentwickelten Quadropters
- Hardware und Software des Paparazzi-Projektes des WS2006 in dessen Verlauf Herr Dei einen autonomen Flug mit einem Flächenflugzeug durchführte.

Die Ergebnisse der Arbeit (Programme und Dokumentation) sind unter die GPL zu stellen.

### 3 Funktionsfestlegung

Zu Beginn der Diplomarbeit wurden mit Herrn Prof. Dr. Warmers die Anforderungen und Realisierungsmöglichkeiten festgelegt. Hierbei wurde schnell deutlich, dass es sinnvoll ist die Sensoren mit den zugehörigen Analog-Digital Umsetzern auf eine vom Mikrocontroller getrennte Platine zu setzen. Die Sensorplatine, im Folgenden nur IMU genannt, sollte mit einer Schnittstelle ausgestattet werden, die es ermöglicht die IMU auch an bereits bestehende Mikrocontrollerboards, hierbei insbesondere das Paparazzi Tiny, anzuschließen.

Während sich für die Auslegung der IMU schnell eine gute Lösung fand, gab es für das Mikrocontrollerboard, im Folgenden nur MCU genannt, mehrere Möglichkeiten.

#### 3.1 Sensorplatine (IMU)

Die Sensorplatine sollte mit folgenden Sensoren ausgerüstet werden:

- Gyroskope
- Beschleunigungssensoren
- Temperatur
- Statischer Luftdruck
- Dynamischer Luftdruck (Staudruck)
- Kompass (Magnetometer)
- SPI Schnittstelle
- 16bit ADC an SPI für Sensoren
- 24bit ADC an SPI für stat. Luftdruck

Als Schnittstelle zwischen der IMU und der MCU wurde die SPI Schnittstelle gewählt. Sie ist in der Lage die geforderten Datenmengen zu transportieren. Ebenso sind die favorisierten Analog-Digital-Umsetzer MAX1168 ebenfalls mit einer SPI Schnittstelle ausgestattet, so dass es bei Verwendung der MAX1168 die Verwendung der SPI obligatorisch wäre. Die analogen Signale der Sensoren sollten auf Steckleisten geführt werden um diese auch ohne die SPI Schnittstelle auswerten und testen zu können.

#### 3.2 Rechnerplatine

Die Auswahl des geeigneten Mikrocontrollers für die Rechnerplatine standen letztendlich drei Mikrokontrollertypen in der Auswahl.

Der bereits eingesetzte und bekannte LPC2148 von NXP, die größeren Varianten des LPC2148, LPC2214 bzw. LPC2294 ebenfalls von NXP, sowie der TMS320F28335 von Texas Instruments.

Für alle Rechnerplatinen bestand die Forderung nach bestimmten Komponenten, welche folgend aufgeführt sind:

- 10 Servoausgänge
- RC Eingang
- Freie ADC auf Steckerleisten geführt
- 2x UART
- 2x I<sup>2</sup>C
- 2x SPI
- Möglichkeit zum Anschluss eines SD-Kartenlesers
- I/O Kanäle auf Stecker bereitgestellt
- Platinenbreite 35mm, max. 40mm

### 3.2.1 Rechnerplatine 1 (LPC2148)

Der bereits bekannte und oft eingesetzte LPC2148 stellt die konservative Lösung da. Über ihn gibt es ausreichend Erfahrungen und bestehende Software. Das größte Problem, das gegen ihn sprach, waren die zu wenigen I/O Leitungen, die schon in vergangenen Projekten zu Problemen führten. Außerdem reicht die Rechenleistung nur für aktuelle Anwendungen aus, jedoch besteht kaum Reserve für zukünftige, rechenintensivere Erweiterungen.

### 3.2.2 Rechnerplatine 2 (LPC2214 / LPC2294)

Der LPC2214/LPC2294 ist ein dem LPC2148 ähnlicher Prozessor, er besitzt jedoch keinen internen RAM und Flash Speicher. RAM und Flash muss in externen Bausteinen angegliedert werden. Somit ergibt sich der Vorteil von mehr als ausreichendem Speicherplatz. Ebenso stehen durch mehr Pins des LPC2214 mehr I/O Leitungen zur Verfügung, was wiederum dem Mangel an I/O Leitungen entgegen wirkt. Der LPC2214 und LPC2294 sind zueinander sehr ähnlich, als Hauptunterschied besitzt der LPC2294 einen integrierten CAN Controller. Problematisch ist hier jedoch auch der Umstieg auf einen neuen, wenn auch ähnlichen Prozessortyp, der Probleme in der Zeitplanung der Arbeit verursachen könnte. So bestehen keinerlei Erfahrungen über externe Speicher. Der Umstieg auf diesen Prozessor wäre somit auch mit einem Risiko der Nichtfunktion behaftet.

### 3.2.3 Rechnerplatine 3 (TMS320F28335)

Der TMS320F28335, ein Digital Signal Controller mit Gleitkommaeinheit, würde mehr als genug Rechenleistung auch für zukünftige Projekte bieten. Ebenso verfügt er über eine Vielzahl von bereits integrierten Schnittstellen und ausreichend I/O Pins, dass das bisher beim LPC2148 bestehende Problem von zu wenigen I/O Leitungen lösen würde. Als kritisch wurde jedoch angesehen, dass es sich um einen völlig unbekannten Prozessortyp handelte, bei dem keinerlei Erfahrung vorhanden war. Zudem gibt es keine freie Entwicklungsumgebung, der Compiler muss gekauft werden. Der Punkt, dass es sich um einen neuen, unbekannten Prozessor handelt, schien es als unmöglich zu erscheinen, im Zeitrahmen einer Diplomarbeit das Projekt erfolgreich abzuschließen.

### 3.2.4 Auswahl Rechnerplatine

Die Wahl fiel schließlich auf die konservative Variante mit dem LPC2148, da hier die größten Chancen gesehen wurden, in der gegebenen Zeit ein flugfähiges System zu konstruieren. Das

bestehende Problem der zu wenigen I/O-Leitungen wurde zuvor durch eine Abschätzung der benötigten und vorhandenen Leitungen überprüft um sicherzustellen, dass genügend I/O Leitungen zur Verfügung stehen um das Projekt zu realisieren. Das Ergebnis der Abschätzung zeigte, dass die Zahl ausreichen sollte. Die fehlende Rechenleistung sollte durch die Möglichkeit ausgeglichen werden über die zweite SPI Schnittstelle ein fertiges Rechnermodul, z.B. ein ARM9 Board, anschließen zu können, das rechenintensive Aufgaben übernimmt und mit dem LPC2148 kommunizieren kann.

## 4 Sensorauswahl

### 4.1 Gyroskope

Für die Auswahl der Gyroskope wurden zunächst per Internetrecherche auf dem Markt erhältliche MEMS Gyroskope erfasst.

Folgende Gyroskope waren derzeit auf dem Markt erhältlich (Typ, Hersteller):

- IDG-300, InvenSense
- ENC-03J, Murata
- ADXRS150/300, Analog Devices
- ADXRS61X Series, Analog Devices
- LISY300AL, ST Microelectronics
- MLX90609-R2, Melexis

Zur Ermittlung des am besten geeignetsten Sensors erfolgte eine Analyse der wichtigsten Kenndaten der Sensoren. Besonders zu beachten sind hierbei der Temperaturdrift, die Nichtlinearität, sowie die Rauschdichte, da diese bei zu schlechten Werten die Funktion der IMU gegebenenfalls beeinträchtigen oder verhindern.

Die Analyse brachte folgendes Ergebnis:

- IDG-300, InvenSense
  - Vorteile: Günstig beschaffbar; 2-achsig, zusammen mit einem Z-Gyro kann eine IMU ohne senkrecht aufgestellte Platinen realisiert werden; geringes Rauschen.
  - Nachteile: Sehr hoher Temperaturdrift, große Nichtlinearität.
- ENC-03J, Murata
  - Vorteile: leicht beschaffbar, viele Erfahrungen in der Verwendung für IMU's vorhanden
  - Nachteile: große Bauform, ungünstige Achsenanordnung, schlagempfindlich, sehr hoher Temperaturdrift



- ADXRS150/300, Analog Devices
  - Vorteile : Sehr gute Werte
  - Nachteile: hoher Preis; schwer zu beschaffen; ADXRS300 ist bereits abgekündigt; BGA Gehäuse
- ADXRS61X Series, Analog Devices
  - Vorteile : Sehr gute Werte, geringster Temperaturdrift und geringste Nichtlinearität aller untersuchten Sensoren; RatioMetric Eingang, ermöglicht Anpassung der Ausgangsspannung an die Referenzspannung des ADC; in gleicher Bauart mit unterschiedlichen Messbereichen erhältlich
  - Nachteile: hoher Preis; schwer zu beschaffen; BGA Gehäuse
- LISY300AL, ST Microelectronics
  - Vorteile: günstig und gut beschaffbar
  - Nachteile: geringe Oszillatorfrequenz, die in anderen Projekten schon zu Problemen durch Beeinflussen durch Motorvibrationen geführt hat [4].
- MLX90609-R2, Melexis
  - Vorteile: Preiswert, von Hand verlötbar
  - Nachteile: sehr große Bauform

Die Wahl fiel schließlich trotz des hohen Preises und der schlechten Beschaffbarkeit auf die ADXRS61X Serie. Begründet liegt dies in den sehr guten Werten, sowie in guten Erfahrungen, die von anderen Projektgruppen mitgeteilt wurden [2, 5]. Für den Prototypen konnte das Beschaffungsproblem dadurch verhindert werden, dass gesamt acht Samples des ADXRS610 von Analog Devices erhalten werden konnten. Aufgrund des BGA Gehäuses ist jedoch ein Prozess zu entwickeln, der es ermöglicht diese Sensoren mit Hochschulmitteln zu verarbeiten.

Während der Auswahl der Gyroskope wurde jedoch beschlossen, eine Möglichkeit zu schaffen, verschiedene Gyroskoptypen nutzen zu können. Dadurch, dass zwei der Sensoren auf senkrecht gestellte Platinen montiert werden müssen, kann hier ein Austausch durch den Tausch der gesamten senkrechten Platinen erfolgen. Für den Z-Gyro, der normalerweise direkt auf die Hauptplatine bestückt werden würde, wurde in diesem Zug festgelegt, ihn auf eine kleine Platine zu montieren, die wiederum auf die Hauptplatine bestückt wird. Als Ersatz sollen daher ebenso die LISY300AL und die MLX90609-R2 verwendbar sein.

## 4.2 Beschleunigungssensoren

Die Auswahl der Beschleunigungssensoren erfolgte auf gleiche Art und Weise wie die bei den Gyroskopen.

Hier wurde besonderes Augenmerk auf den Temperaturdrift, Nullpunktdrift, Nichtlinearität und Achsenübersprechen gelegt.

Die Auswertung ergab, dass die Sensoren von Analog Devices den besten Gesamteindruck vermittelten. Die Sensoren von ST Microelectronics vermittelten insgesamt auch kein schlechtes Bild und hätten bei einigen Bausteinen eine einfache Umschaltung des Messbereiches von 2g oder 6g ermöglicht. Insgesamt überzeugten die Analog Devices Sensoren jedoch mehr. Hinzu kam noch, dass in einem Probeaufbau einer IMU innerhalb des Labors der verwendete ST Sensor einen massiven Empfindlichkeitsfehler zeigte.

Die genauere Auswahl fiel schließlich auf eine Kombination des ADXL330, ADXL320 und ADXL323. Je nach Kombination können die Achsen somit auch in unterschiedlichen Messbereichen vermessen werden. Die Art der Kombination wurde im Design ermittelt.

Das Layout wurde so ausgeführt, dass verschiedene Sensoren bestückt werden können um verschiedene Messbereiche zu realisieren

## 4.3 Magnetsensor

Als Magnetsensoren standen zum einen der MicroMag3 als fertiges Modul zur Verfügung wie auch eine Schaltungsvariante mit drei KMZ51 Hall-Sensoren, entwickelt von Holger Buss [6], basierend auf einem Applikationsbericht von NXP [8]

Der MicroMag3 ist ein fertiges Modul, welches über die SPI Schnittstelle angesprochen wird. Hier besteht jedoch der Nachteil, dass er ein sehr langsamer Baustein ist, der in seiner Messzeit den SPI Bus nicht frei gibt, so dass keine sichere Datenerfassung von den flugwichtigen Sensoren mehr möglich ist. Der SPI Bus, welcher die flugwichtigen Sensoren ausliest, kann daher nicht für dem MicroMag3 verwendet werden. Zudem hat er ein sehr großes Bauvolumen

Die Schaltungsvariante mit drei KMZ52 Sensoren kann dagegen mit den vorhandenen ADC's ausgelesen werden und lässt sich platzsparend direkt mit auf den Sensorplatinen platzieren.

## 5 Bauteilauswahl

### 5.1 Analog-Digital-Umsetzer

Als Analog-Digital-Umsetzer für die Signale der Beschleunigungs- und Drehratensensoren, sowie die Signale der anderen Sensoren werden hochauflösende Typen mit einer möglichst hohen Kanalanzahl benötigt. Die Wahl fiel hierbei auf den MAX1168 von Maxim. Dieser ADC besitzt eine Auflösung von 16-Bit, 8-Kanäle und ist durch sein Umsetzverfahren der sukzessiven Approximation schnell, das Messergebnis steht sofort im Anschluss der Messanfrage zur Verfügung. Er wurde bereits für vorausgegangene Projekte erfolgreich verwendet [1], ebenso existieren für ihn bereits die nötigen Softwaretreiber.

Zur Auswertung des Absolutluftdrucks wird eine höhere Auflösung als 16-Bit benötigt, um auch Höhenänderungen im cm-Bereich erfassen zu können. Der in früheren Projekten verwendete einkanalige 24Bit Umsetzer LTC2400 von Linear Technology erwies sich hierbei als sehr langsam. Als schnellerer 24Bit Umsetzer ist ebenfalls bei Linear Technology der LTC2440 erhältlich. Im Gegensatz zum LTC2400, der mit einer festen Genauigkeit und damit festen Konvertierungsgeschwindigkeit arbeitet, kann der LTC2440 durch ein per SPI gesendetes Kommandowort auf verschiedene Genauigkeiten und damit Konvertierungsgeschwindigkeiten umgestellt werden. Die erreichbare Konvertierungsgeschwindigkeit des LTC2440 ist

abhängig von der Genauigkeit mit der die Konvertierung erfolgen soll. Je weniger Zeit für einen Konvertierungsvorgang zur Verfügung steht, je geringer ist die Genauigkeit. Die Geschwindigkeit ist jedoch im Vergleich mit dem LTC2400 bei gleicher Genauigkeit von 24Bit erheblich höher.

### 5.2 Spannungsversorgung

Für die Spannungsversorgung der Elektronik kamen bei allen Spannungen der IMU und der analogen Spannungen der MCU rauscharme Spannungsregler des Typs LT1761 von Linear Technology zum Einsatz. Die Versorgung der digitalen Spannungen der MCU erfolgt durch LT1117 Regler, die Bereitstellung der Servospannung durch einen Schaltregler PTH08080 von Texas Instruments.

## 6 Blockschaltbild

Bild 1 zeigt das Blockschaltbild des Autopiloten mit seinen wichtigsten Komponenten. Auf der Seite links der grauen Strichpunktlinie sind die Komponenten der IMU, wie Sensoren und Analog-Digital-Umsetzer dargestellt.

Rechts der grauen Strichpunktlinie befinden sich die Komponenten der MCU. Den Kern bildet hier der Mikroprozessor, umgeben von den Peripheriebausteinen.

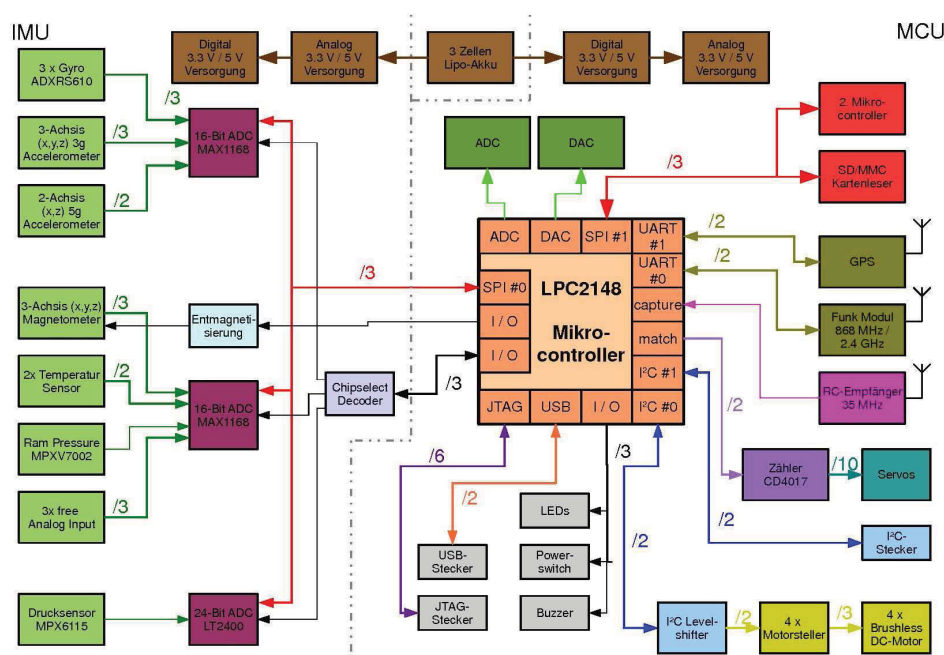


Bild 1: Blockschaltbild des Autopiloten

## 7 Bauteilpositionierung

### 7.1 IMU

Als mechanische Vorgaben für die IMU waren vier 3mm Befestigungsbohrungen in quadratischer Anordnung mit je 30mm Lochabstand vorgeschrieben. Die Abmessungen der Platine waren so klein wie möglich zu halten.

Um alle Achsen messen zu können müssen die Sensoren so angeordnet werden, dass sie je in einer Achse liegen. Bei den nur einachsigen ausgeführten Gyroskopen erfordert die zwei auf der Grundplatine senkrecht und im rechten Winkel zueinander stehenden Platinen. Gleiches gilt für die Magnetsensoren. Die Beschleunigungssensoren sind je nach Typ zwei- bzw. dreiaxsig ausgeführt. Je nach Sensorbestückung ist es nötig, ebenfalls einen der Sensoren senkrecht zur Hauptplatine zu montieren.

Bei Anordnung der aufgestellten Winkel ist eine Anordnung in L- oder T-Form sinnvoll, da so Winkelfehler leichter gering gehalten werden können.

Nach Platzierung aller Bauteile betrug die Platinengröße letztendlich 45x40mm. Dies waren die geringsten Abmessungen, die mit den geforderten Funktionen realisierbar waren. Vor allem der Differenzdrucksensor nimmt einen großen Raum ein.

### 7.2 MCU

Die Verbindung zwischen IMU und MCU erfolgte über einen Platinenstapelstecker, wodurch eine leichte Montage und auch Demontage erreicht werden konnte.

Bei der MCU stellte sich als größtes Problem heraus, die Steckleisten auf einer Platine mit gleichen Maßen der IMU sinnvoll unterzubringen.

Die Anordnung der Steckverbinder in mehreren Reihen, wie sie nötig gewesen wäre, erwies sich als nicht praktikabel, da die Leitungen von den hinteren Steckern aufgrund des geringen Pinabstand der Steckverbinder nicht weggeführt werden konnten. SMD Stecker als Alternative konnten nicht eingesetzt werden, da ihre benötigte Fläche auf der Leiterkarte erheblich größer ist als lochmontierte Stecker.

Erst durch eine Vergrößerung der Platine auf 57mmx40mm konnte eine sinnvolle Anordnung der Stecker erreicht werden und somit auch eine sinnvolle Anordnung der Bauteile.

## 8 Das Routen

Das Routen erfolgte unter Beachtung üblicher Regeln. Allgemein wurden der obere und untere Layer für kurze Wegstrecken, also die Verbindung von benachbarten Bauteilen, genutzt. Über den oberen der beiden Mittellayer wurden Signale geführt, die lange Wegstrecken auf der Platine zurücklegen. Der untere der Mittellayer war einer Massefläche vorbehalten. Leitungen, welche stark störende Signale führen (SPI), wurden in Abstand und möglichst nicht parallel zu empfindlichen, analogen Leitungen verlegt.

Signalleitungen wurden mit einer Leiterbahnbreite von 6mil verlegt. Stromversorgungsleitungen wurden mit dynamischer Breite entsprechend ihrer Strombelastung vorgesehen.

Das Routen erfolgte ausschließlich manuell per Hand um einen optimalen Leiterbahnverlauf zu erreichen und die Packungsdichte möglichst hoch zu gestalten. Spätere Versuche mit Autoroutern, um eventuell bessere Ergebnisse zu erreichen, kamen zu keinen Ergebnissen, da die Autorouter die Leiterkarten nicht vollständig entflechten konnten.

Nach vollendeter BauteilAusrichtung und Routingvorgang wurde ein Pappmodell des Autopiloten erstellt um zu kontrollieren ob die Baugruppen mechanisch zusammen passten oder ob sich Bauteile gegeneinander behinderten. Mit Hilfe des Modells konnten mechanische Konflikte ausgeschlossen werden und zugleich konnte ein Eindruck gewonnen werden wie der neue Autopilot aussehen wird.

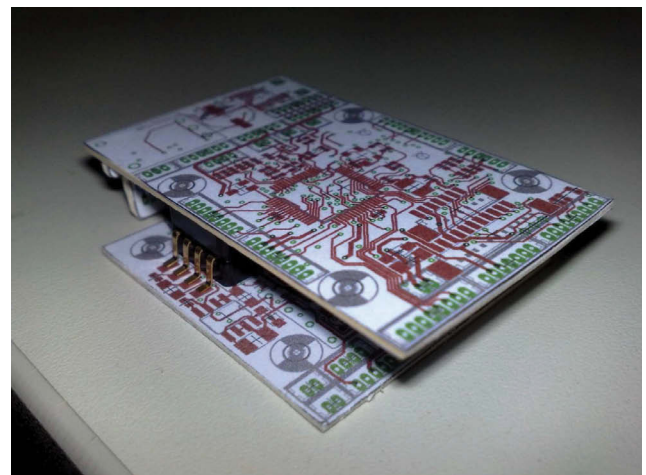


Bild 2: Pappmodell mit beiden übereinander gelegten Teilen

## 9 Prozess zum Löten von Bauteilen in BGA und QFN Gehäusen

### 9.1 Bestehendes

Zum Löten der BGA und QFN Gehäuse ist es erforderlich einen Reflowlötprozess zu benutzen. Hierzu stand aus einem früheren Projekt ein Pizzaofen mit externer Steuerung durch eine Schaltung der Zeitschrift Elektor [7] zur Verfügung. Der Ofen wurde von mir im Rahmen einer Aushilfstätigkeit nach dem Entwurf der Elektor aufgebaut und in Betrieb genommen. Eine genaue Einstellung sowie Ermittlung eines optimalen Temperaturverlaufs erfolgte jedoch noch nicht. Ein Reflowprozess beinhaltet einen bestimmten Temperaturverlauf, der von der Reflowanlage möglichst gut realisiert werden sollte.

### 9.2 Parameterermittlung

Zur Ermittlung der Parameter wurden zum einen empfohlene Temperaturprofile aus Datenblättern von Bauteilen verwendet, die genaue Festlegung erforderte jedoch auch mehrere Testläufe um ein Verbrennen der Leiterkarten zu verhindern, gleichzeitig aber auch ein einwandfreies Schmelzen der Lötpaste und somit eine einwandfreie Lötstelle zu erreichen.

Aus dem im Datenblatt des ADXL330 angegebenen Temperaturprofil konnten dann schließlich mit leichten Anpassungen an das Temperaturverhalten des Ofens die in Tabelle 1 dargestellten Parameter ermittelt werden. Die angegebenen Parameter beziehen sich auf die in der Steuerung von Elektor veränderbaren Parameter.

Tabelle 1: Endgültige Parameter

Prozessphase	Wert
Preheatslope	2°C/s
Preheattemp	120°C
Soaktime	100sec
Endtemp	140°C
Reflowtime	20sek
Reflowtemp	225°C

### 9.3 Probelötungen von BGA Bausteinen

Um das Positionieren und Verlöten von BGA Bausteinen zu üben, war es sinnvoll Testbausteine zu beschaffen, um die teuren und schwer beschaffbaren Drehratensensoren zu schonen.

Als Alternative fand sich bei Maxim ein DS2148 im 49-BGA Gehäuse welcher als Sample schnell und einfach lieferbar war und so für Versuche genutzt werden konnte. Die eigentliche Funktion des Bausteins war unerheblich und wurde für den Test nicht realisiert.

Als Testleiterplatte wurde eine einseitige Leiterplatte mit dem BGA Footprint selbst hergestellt. Die jeweils außenliegenden Pins des BGS wurden zur Kontrolle von Kurzschlüssen nach außen geführt. Die innenliegenden Pins wurden nicht kontaktiert.

Nach dem Auftragen der Lötpaste mit einem spitzen Draht durch Auftupfen und Positionierung des BGA Bausteins per Hand erfolgte die Verlötung im Reflowofen.

Erste optische Kontrollen und spätere Test per Durchgangsprüfer zeigten keine Kurzschlüsse und ein augenscheinlich gutes Lötergebnis.

Für eine genauere Untersuchung der Lötverbindung war es sinnvoll auch die inneren Lötverbindungen untersuchen zu können. Um diese zu untersuchen wurde versucht das IC mechanisch von der Platine zu brechen. Hierbei brach idealerweise die Verbindung zwischen den Balls und dem Gehäuse, so dass nun eine Platine mit den verlöteten Balls und ein völlig ebenes IC vorlagen. Eine genaue Untersuchung der Platine mit den verlöteten Balls ergab an allen Pins eine einwandfreie Verlötung ohne Kurzschlüsse (Bild 3). Die Bilder 4-7 zeigen die fertig bestückten Platinen des Autopiloten.

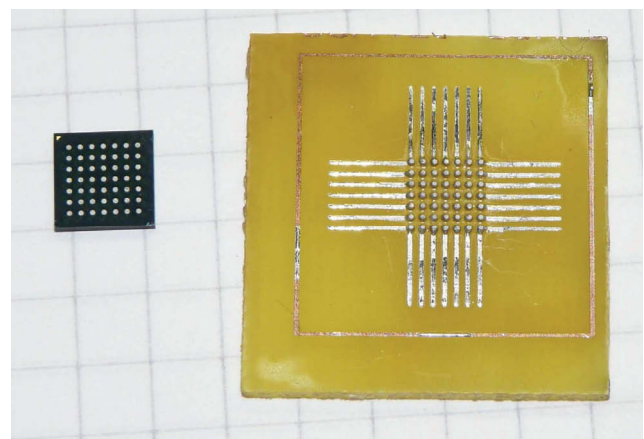


Bild 3: Nach verlöten wieder entferntes BGA IC



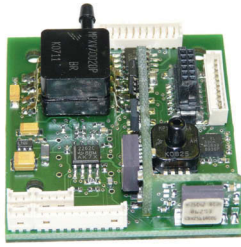


Bild 4: Fertig aufgebaute IMU

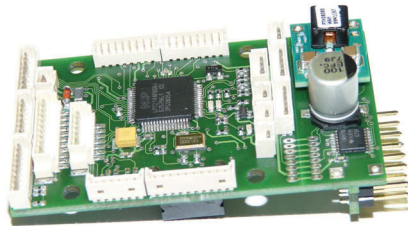


Bild 5: Fertig aufgebaute MCU

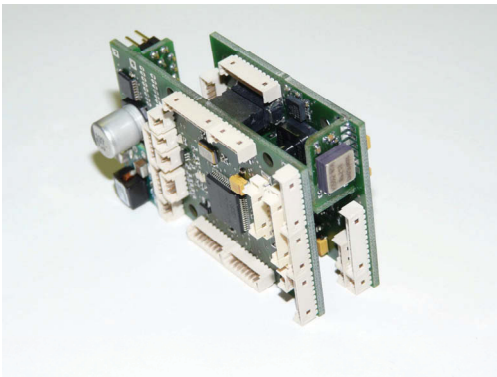


Bild 6: IMU und MCU zum Autopiloten gesteckt

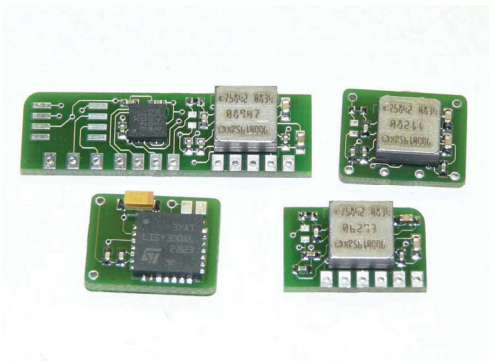


Bild 7: Sensorsatz

## 10 Softwareanpassung

Die Steueralgorithmen für den Flugbetrieb eines Quadropters wurden als Hilfsmittel für diese Arbeit bereits fertig zur Verfügung gestellt. Aufgabe war es jedoch noch die Software an die Gegebenheiten der neuen Hardware anzupassen.

Als Hauptaufgabe im Softwareteil galt das Schreiben der SPI Treiber um die Sensordaten über der externen ADC's einzulesen.

Die Routinen zum Auslesen der ADC's sind für eine optimale Ausnutzung der Rechnerleistung nicht über Wartezyklen, sondern über Interrupts gesteuert.

Der die Kommunikation des SPI Bus durchführende Algorithmus setzt sich aus zwei Zustandsautomaten zusammen, wobei der erste als Interruptservice-Routine aufgerufen wird und das Lesen und Schreiben auf dem Bus kontrolliert. Der zweite Zustandsautomat wird vom Ersten aufgerufen und teilt dem Ersten mit was zu den ADC's geschrieben (welcher ADC, Kanalnummer Konvertierungsmodus) bzw. gelesen (Konvertierungsergebnis) werden soll.

Die von den Sensoren gelieferten Rohdaten werden in einer weiteren Funktion in physikalische Einheiten umgerechnet. Dies dient zum Einen der leichteren Interpretierbarkeit der Daten, aber auch zur Anpassung an die Regelalgorithmen, welche Daten in physikalischen Einheiten erwarten.

Ebenfalls angepasst werden mussten die Rohdaten der Magnetsensoren, hier erwarten die Regelalgorithmen eine Winkelangabe von 0-359° mit der Nordposition bei 0°. Für die Auswertung der Rohdaten wurde eine fertige Routine zur Verfügung gestellt, die jedoch für einen anderen Sensor (MikroMag3) konzipiert war. Die Routine musste daher an die neuen KMZ51 Sensoren angepasst werden.

## 11 Kalibrierung

Für einen späteren völlig autonomen Flugbetrieb eines Quadropters ist eine Kalibrierung der Sensoren erforderlich.

Es werden hierzu den Sensoren definierte Bedingungen auferlegt und die Antworten der Sensoren aufgezeichnet.

### 11.1 Drehratensensoren

Für die Kalibrierung der Drehratensensoren muss eine konstante Drehbewegung mit bekannter Drehgeschwindigkeit zur Verfügung gestellt werden. Als einfache Methode bot sich hier ein Plattenspieler an. Als Problem stellte sich die Genauigkeit der Drehzahl heraus. Zwar konnte über Feinregler die

Drehzahl korrigiert, jedoch nicht auf einen definierten Wert eingestellt werden.

Es war somit von Nöten eine Drehzahlmessung zu konstruieren. Die einfachste Möglichkeit bestand hierbei in der Verwendung einer mit einfachen Bauteilen aufgebauten Lichtschranke zur Detektion einer Umdrehung. Die Auswertung der Impulse erfolgte mit einem im Labor vorhandenen Frequenzzähler, der eine hohe Genauigkeit und Auflösung bei geringem Aufwand bot.

Die fertig aufgebaute IMU wurde auf die Art und Weise in allen 6-Richtungen vermessen und aus den gemessenen Daten Korrekturfaktoren ermittelt.

## 11.2 Beschleunigungssensoren

Die Kalibrierung der Beschleunigungssensoren gestaltet sich im Vergleich mit den Gyroskopen als einfach, da als Referenz die Erdanziehungskraft genutzt werden kann. Zur Kalibrierung werden für jede Achse die positiven, negativen sowie die Messwerte der Neutralposition aufgezeichnet und aus den Abweichungen zum Sollwert die Korrekturfaktoren berechnet.

## 12 Aufbau des Quadropters

Als Nachweis der Funktionstüchtigkeit der neuen Hardware sollte diese in einem Quadropter eingesetzt werden. Ein Quadropter ist ein Schwebefluggerät mit zwei rechts- bzw. zwei linksdrehenden Luftschrauben, der ausschließlich durch Drehzahlveränderung der elektrischen Antriebsmotoren gesteuert wird. Quadropters sind von Hand nicht fernzusteuern und benötigen drei Drehratensensoren, um einen stabilen Flug zu ermöglichen. Es handelt sich um ein inhärent instabiles Flugsystem, welches durch die Basisregelung stabilisiert werden muss. Beschreibungen der Algorithmen des Steuerverfahrens können den Arbeiten [2], [3] und [5] entnommen werden.

Der fertiggestellte Autopilot wurde schwingungsgedämpft und gegen Überschlager geschützt mit den Hilfskomponenten (Motorsteller, Fernsteuerungsempfänger) auf einen ebenfalls gefertigten Rahmen montiert und war so für die ersten Flugerprobungen einsatzbereit. Nach einigen Anpassungen an den Regelparametern war es so zum Abschluss der Arbeit möglich, stabil und kontrolliert per Fernbedienung zu fliegen. Die praktische Eignung der innerhalb der Arbeit entstandenen Hard- und Software ist somit nachgewiesen. Bild 8 zeigt den fertig aufgebauten Quadropter und Bild 9 zeigt den

Quadropter im Schwebeflug im Flur des Elektrotechnikhochhauses der Hochschule Bremen.

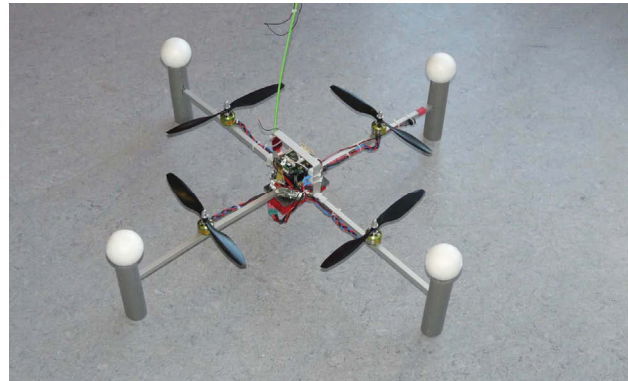


Bild 8: Fertig aufgebauter Quadropter



Bild 9: Quadropter im Flug

### Literatur:

- [1] Studienarbeit, Henning Sauerland, Andreas Dei, SS2007, Hochschule Bremen
- [2] Diplomarbeit, Andreas Kleinert, SS2008, Hochschule Bremen
- [3] Bachelorthesis, Christoph Niemann, WS2008/2009, Hochschule Bremen
- [4] Forum <http://www.mikrokoetter.de>, <http://forum.mikrokoetter.de/topic-post67563.html>, Post 29ff, 19.03.09
- [5] Waypoint Navigation, Stabilization and Sensor Drift Compensation of VTOL MAV, Prof. Dr. Heinrich Warmers, Andreas Kleinert, Juli 2008
- [6] <http://www.mikrokoetter.de/ucwiki/MK3Mag>, 15.12.2008
- [7] Elektor 1/2006, S. 32ff, SMD-Löten
- [8] Applikationsbericht, Philips Semiconductors, AN00022, 30.03.2000