
FC_REV_A_SPEC Documentation

Release 0.1

Dipl.-Ing. (FH) Andreas Gschossmann

20.07.2015

The Kalman Filter in its various forms is clearly established as a fundamental tool for analyzing and solving a broad class of estimation problems.

***Leonhard McGee and Stanley Schmidt,
Ames Research Center, NASA***

Abkürzungsverzeichnis

SappZ	Sensorik-Applikationszentrum
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UAS	Unmanned Aerial System
GUI	Graphical User Interface
QR	Quick Response
CBRNE	Chemical, Biological, Radiological, Nuclear and High-Yield Explosive
LuftVG	Luftfahrtgesetz
DLR	Deutsches Luft und Raumfahrtzentrum
PID	Proportional Integral Derivative
GPS	Global Positioning System
FAA	Federal Aviation Administration
NAS	National Airspace System
RPAS	Remotely Piloted Aircraft Systems
SESAR	Single European Sky ATM Research
ATM	Airtraffic Control
I2C	Inter IC Bus
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver Transceiver
USB	Universal Serial Bus
RISC	Reduced Instruction Set Computer
ARM	Acorn RISC
DSP	Digitaler Signal Prozessor
IMU	Inertial Measurement Unit
IC	Integrated Circuit
EOMA	Embedded Open Modular Architecture
PPM	Puls-Position Modulation
SSH	Secure Shell
OTG	On-The-Go
GPIO	General Purpose I/O
GND	Ground
PHY	Physical Layer

LSB	Least Significant Bit
DDR	Double Data Rate
SDRAM	Synchronous Dynamic Random Access Memory
SOM	System on Module
TTL	Transistor-Transistor-Logik
MDIO	Management Data I/O
MII	Media Independent Interface
SD	Secure Digital
PMIC	Power Management IC
PLL	Phase Locked Loop
RTC	Real Time Clock
ESD	Electro Static Discharge
LED	Light Emitting Diode
EMU	Emulation
JTAG	Joint Test Action Group
TI	Texas Instruments
MMC	Multimedia Card
WP	Write Protect
CD	Card Detect
PCB	Printed Circuit Board
pwt	Power
CU	Cuprum, Kupfer
LQ	Linear Quadratic
KF	Kalman-Filter
EKF	Extended Kalman-Filter
API	Application Programming Interface
XML	Extensible Markup Language
SDF	Simulator Description Format
TCP	Transmission Control Protocol
IP	Internet Protocol
MT	Momentum Theorie
3D	Dreidimensional

SIL	Software in the Loop
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
INS	Inertiale Sensorik
UKF	Unscented Kalman-Filter
DKF	Distributed Kalman-Filter
MARG	Magnetic, Angular Rate, Gravity
AHRS	Attitude Heading Reference System
RTK	Realtime-Kinematics
DGPS	differential GPS
QZSS	Quasi Zenit Satelliten System
GLONASS	Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema
MEMS	Microelectromechanical System
GPL	Gnu General Public Lizenz
SAS	Stabilized Augmented Systems
JSON	JavaScript Object Notation
BSD	Berkeley Software Distribution
LGPL	Lesser General Public License
I/O	Input/Output
MIT	Massachusetts Institute of Technology
UTF-8	8-Bit Universal Character Set Transformation Format
ASF	Apache Software Foundation
CAN	Controller Area Network
GSM	Global System for Mobile Communications
USAR	Urban Search and Rescue

Abkürzungsverzeichnis	5
1 Einleitung	1
1.1 Ziel der Arbeit	1
1.2 Stand der Technik	1
1.3 Rahmenbedingungen	1
2 Systemübersicht	3
2.1 Schematische Struktur	3
2.2 Mechanischer Aufbau	4
3 Aufbau	7
3.1 Pinbelegung	7
3.1.1 Breakout-Connector	7
3.1.2 EOMA-68-Connector	7
3.1.3 Receiver-Eingang	8
3.1.4 I2C-Motortreiber	9
3.1.5 UART-Debug-Port	9
3.1.6 Analoge Eingänge	9
3.2 Inertiale Messeinheit	10
3.2.1 Funktionsweise	10
3.2.2 Wahl der Sensoren	10
3.2.3 Orientierung der IMU-Sensoren	12
3.3 Abmessungen	12
4 Technische Daten	15
4.1 Features	15
4.2 Specs	15
5 Schaltungsdesign	17
5.1 Signalübersicht und Überprüfung des Pinmultiplexing	17
5.1.1 TIs Pinmultiplexing Utility	17
5.1.2 I2C	17
5.1.3 SPI	18
5.1.4 UART	19

5.1.5	Timer	19
5.1.6	MMC/SD	19
5.2	Versorgung	19
5.3	Clocks	20
5.4	Reset	21
5.5	Testpunkte	22
5.6	User LEDs	23
5.7	Debug Interface	23
5.8	Sensoren IMU	24
5.9	USB	24
5.10	Micro SD-Card	25
6	Layout	27
6.1	Aufbau der Lagen	27
6.2	Toleranzen	28
6.3	USB	28
6.4	Footprint OMAP-L138 SOM-M1	29
6.5	Footprint JTAG Debugger	30
7	Ausblick	31
	Anhang	31
	Literaturverzeichnis	55

Einleitung

1.1 Ziel der Arbeit

Es soll eine Flughardware für einen Quadrocopter entwickelt werden die im Wesentlichen zwei Aufgaben erfüllen soll.

- Sie dient als **Flugsteuerung** eines Quadrocopters und soll Lage- und Positionsregelung in Echtzeit übernehmen. Dafür dienen Sensorwerte inertialer Sensorik als Eingangswerte für die Bestimmung der Orientierung im Raum. Daraus werden die Ausgangswerte errechnet um die Motoren anzusteuern. Diese werden an die bereits bestehende Motorreglerhardware über **CAN-** oder **I2C-Bus** weitergegeben.
- Desweiteren soll sie als **Sensorplattform** dienen und Treiber- sowie Steueraufgaben übernehmen. Für diese Aufgabe ist die Möglichkeit der Anbindung an ein Betriebssystem, der Echtzeitfähigkeit vorangestellt. Dadurch können Treiber für Payloadsensoren rascher entwickelt werden.

1.2 Stand der Technik

Die bekanntesten kommerziellen Quadrocopterhersteller sind wohl *microdrones* [8] und *Ascending Technologies* [11]. *Ascending* bedient dabei eher den Forschungsmarkt und *MicroDrones* bietet Lösungen für den industriellen Einsatz. Eine Neuerscheinung ist der *ScaraBot* der Firma *DaVinci Copters* [19]. Dieser weißt ähnlich lange Flugzeiten wie das derzeit größte Modell von *MicroDrones* (*MD-1000*) auf (mit 600 Gramm Gewicht 30 Minuten). Es existieren derzeit mehrere Closed und Open Source Flugsteuerungen. Einige der bekanntesten Open Source Flugsteuerungen wurden in [21] zusammengetragen und verglichen.

1.3 Rahmenbedingungen

Der Grundbaustein der Hardware ist der Dual-Core Prozessor *OMAP-L138* von Texas Instruments. Er beherbergt einen **DSP-** sowie einen **ARM-Core**. Der **DSP-Core** soll alle Echtzeitanwendungen ausführen. Er ist gut geeignet für die rechenintensiven Flugregelungs- und Positionsschätzungsalgorithmen. Dabei kommuniziert die ineritale Sensorik mit diesem Teil des Kerns.

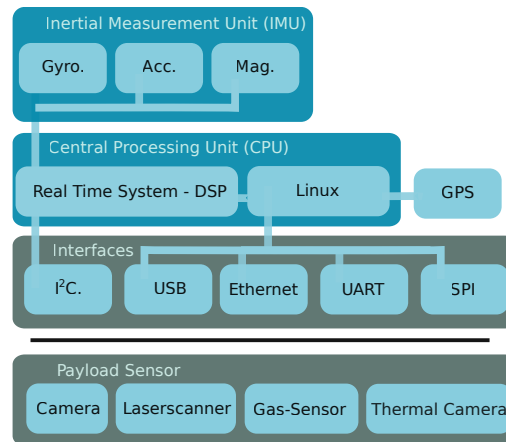


Abbildung 1.1: Grundsätzliche Struktur der Flugsteuerung

Auf dem [ARM](#)-Controller läuft ein Linux-Betriebssystem. Hier wird High-Level-Software, wie Netzwerkkommunikation oder Treibersoftware für die Payload-Sensoren ausgeführt werden. Der wesentliche, strukturelle Aufbau der Hardware wird in [Abbildung 1.1](#) gezeigt.

Systemübersicht

2.1 Schematische Struktur

Herzstück der Flugsteuerung ist das System on Module (**OMAP-L138 SOM-M1**) von LogicPD mit dem Prozessor **OMAP-L138** von Texas Instruments. Dieses Board stellt 64MB Arbeitsspeicher zur Verfügung und läuft bei einer Frequenz von bis zu 375 MHz. Der benutzte Prozessor OMAP-L138 beherbergt zwei Prozessorkerne - einen **ARM9** Prozessor und einen digitalen Signalprozessor (Fix- und Floatingpoint Arithmetik). Auf dem **ARM9** läuft ein Linux-System, welches die Ansteuerung von externer Peripherie und einen Teil der Auswertung des **GPS**-Signals übernimmt. Der Digitale Signalprozessor ist für alle zeitkritischen Aufgaben zuständig. Hier werden hauptsächlich die Algorithmen für die Positionsregelung laufen.

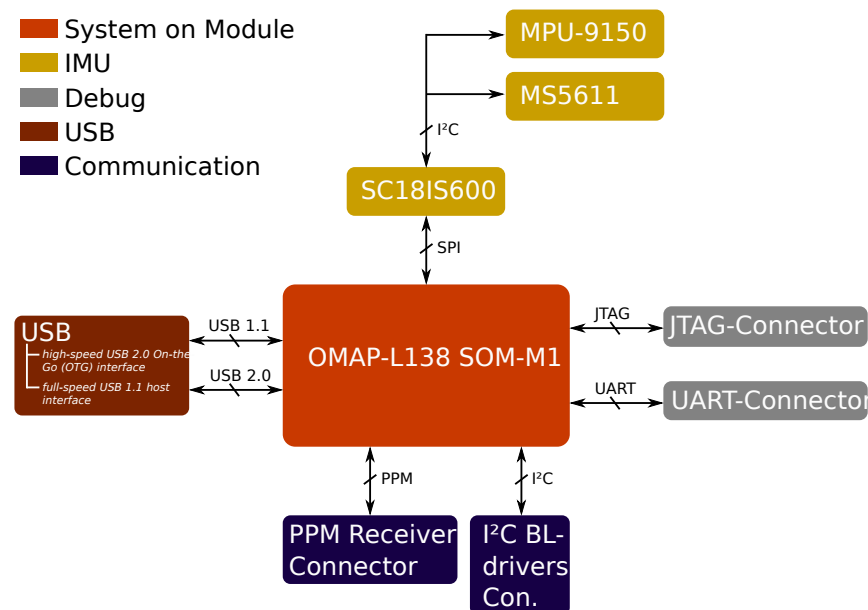


Abbildung 2.1: Blockdiagramm der Flugsteuerung

Die inertielle Messeinheit (*Inertial Measurement Unit*, **IMU**) besteht zum einen aus den Sensoren **MPU9150**, sowie **MS5611**. Der MPU9150¹ beherbergt mehrere Sensoren in einem Gehäuse. Dieser IC enthält so-

¹ MPU9150 ist abgekündigt und sollte in zukünftigen Designs durch MPU9250 ersetzt werden. Die beiden ICs sind pinkompa-

wohl einen dreiachsigen Magnetfeld-, einen dreiachsigen Beschleunigungs- und einen dreiachsigen Drehratensensor, als auch einen Temperatursensor. Seine Ausrichtung und Position wird in Grafik 3.3 dargestellt. Der MS5611 misst den barometrischen Höhendruck. Die IMU selbst wird in Kapitel 3.2 genauer beschrieben. Da die inertialen Sensoren zwar beide über I2C angesteuert werden, jedoch kein freier I2C Port, aber dafür ein SPI Port für sie zur Verfügung steht, wird der SC18IS600 verwendet. Dieser Chip stellt einen I2C Master Port zur Verfügung, welcher über SPI (Slave) angesteuert werden kann.

2.2 Mechanischer Aufbau

In der Mitte des Boards befindet sich das System on Module (OMAP-L138 SOM-M1) ⑪, welches den Prozessor enthält. Es wird über drei Hirose-Stecker (DF40C-100DS-0.4V(51)) auf die Flugsteuerung gesteckt. Mehr Infos zu den technischen Daten des Prozessors und der Speicher auf dem SOM finden sich in Kapitel 4.

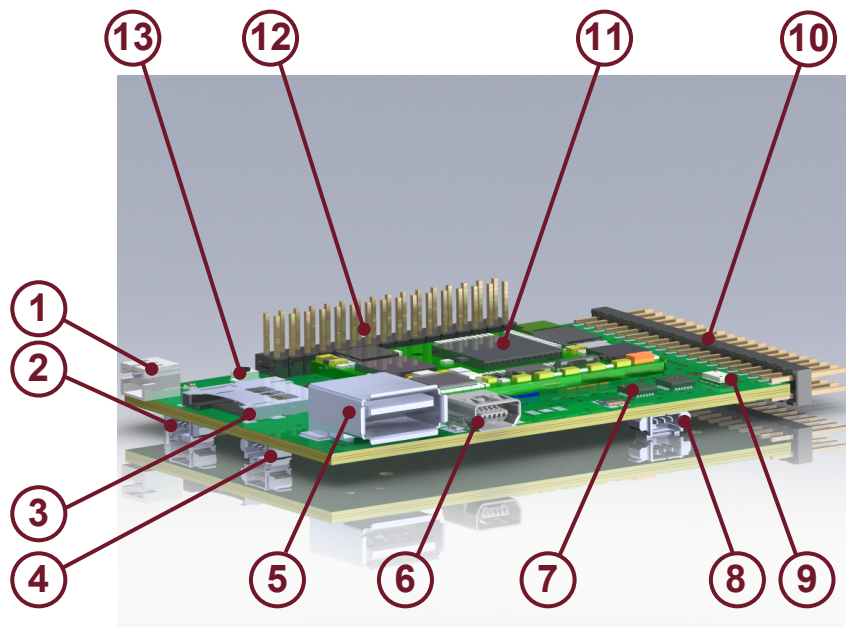
Über den Breakout-Connector ⑫ werden viele Signale für die freie Verwendung auf eine Pfostenleiste geführt. Ein weiterer Breakout-Connector ⑩ ist teilweise mit der EOMA-68 Richtlinie [9] konform. Hier kann später über ein Adapterboard ein leistungsfähiges Prozessorboard, welches der EOMA-68 Richtlinie entspricht, angeschlossen werden.

Der Stecker ① dient zur Versorgung des Boards mit 5V. In den SD-Card Stecker ③ kann die Mikro-SD-Card gesteckt werden, von welcher das Betriebssystem gebootet wird. Der Stecker ② dient als Debug-UART-Port für das Linux-System.

Das Linux-System wird so eingerichtet, dass auf diesem Port die Bootmeldungen, sowie eine Standardkonsole ausgegeben werden. Auf den Stecker ④ ist der I2C-Port herausgeführt, welcher für die Ansteuerung der Motortreiber vorgesehen ist. Der Stecker ⑧ ist für den Anschluss des PPM-Receiver vorgesehen.

Der full-speed USB 1.1 Host Port ⑤ wird vor allem dafür verwendet, einen USB-Ethernet-Converter anzuschließen. Über diesen kann vom Host-Rechner aus über eine SSH-Konsole auf die Flugsteuerung zugegriffen werden. So kann die Flugsteuerung konfiguriert und programmiert wer-

tibel, Treiber müssen für die Nutzung des MPU9250 angepasst werden.



den. Der High-Speed **USB 2.0 OTG Port** ⑥ steht zur freien Nutzung zur Verfügung. Er kann beispielsweise später zur Konfiguration des Boards an einem Rechner über eine Benutzeroberfläche benutzt werden. Außerdem können hier große Datenmengen übertragen werden (480 Mbit/s).

Die **IMU-Sensoren MPU-9150** ⑦ und **MS5611** ⑨ befinden sich rechts unten auf der Flugsteuerung. Auf der Rückseite der Flugsteuerung befinden sich ein Stecker mit vier analogen Eingängen (X6) und Kontakte für einen **TC2050-IDC-NL JTAG-Connector** (Abbildung 2.2), welcher in Kombination mit dem **TC-C2000-M Adapter** von Tag-Connect benutzt wird. Über diesen kann man das Board mit dem **XDS100v2 JTAG-Emulator** von Texas Instruments debuggen und programmieren.

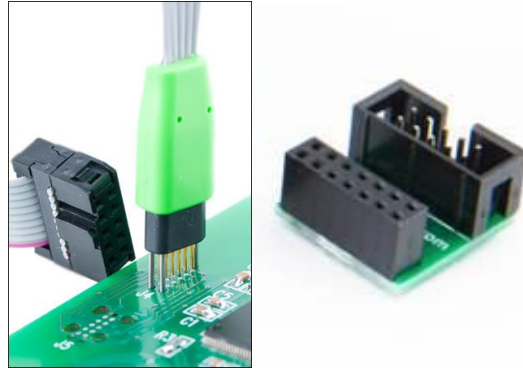


Abbildung 2.2: Tag-Connect Stecker, Links: TC2050-IDC-NL, Rechts: TC-2000-M Adapter

Die Position der Koordinatensysteme der inertialen Messung auf der Flugsteuerung werden in Kapitel 3.2.3 beschrieben. Die Pinbelegungen der einzelnen Stecker finden sich in Kapitel 3.1 und die Abmessungen des Boards in Kapitel 3.3. Die technischen Daten werden in Kapitel 4 angesprochen.

3.1 Pinbelegung

3.1.1 Breakout-Connector

Zusätzlich zu USB-Schnittstellen und den Anschlüssen für die Peripherie stellt die Flugsteuerung I2C, SPI, UART, GPIOs und Timer auf einem Breakout-Connector zur Verfügung. Abbildung 3.1 zeigt die Pinbelegung des Breakout-Connectors.

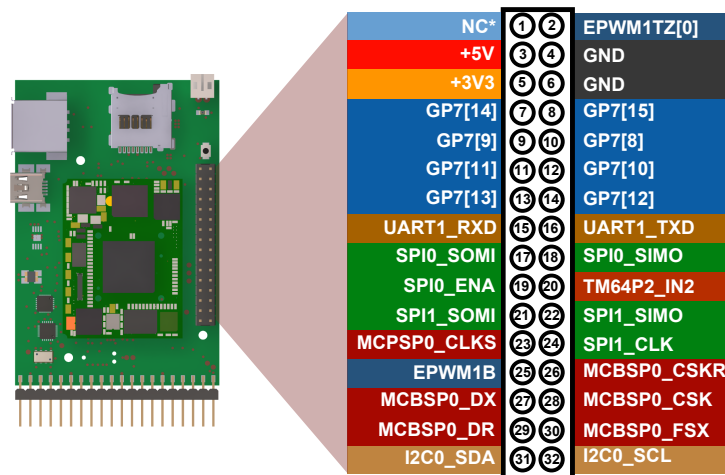


Abbildung 3.1: Pinout des Breakout-Connectors

Außerdem befinden sich 5V-, 3,3V und GND-Pins auf dem Breakout-Connector. Die Pegelspannungen aller Ein- und Ausgänge betragen 3,3V.

3.1.2 EOMA-68-Connector

Seitlich an der Flugsteuerung befindet sich ein Stecker, der soweit wie notwendig den EOMA-68 Richtlinien genügt. Die Pinbelegung wird in Abbildung 3.2 dargestellt. Hier kann bei Bedarf

über ein kleines Adapterboard ein leistungsfähiges Prozessorboard, welches ebenfalls die EOMA-68 Richtlinien erfüllt angeschlossen werden. Für die Kommunikation stehen in diesem Fall eine I2C-Schnittstelle und einige GPIOs zur Verfügung.

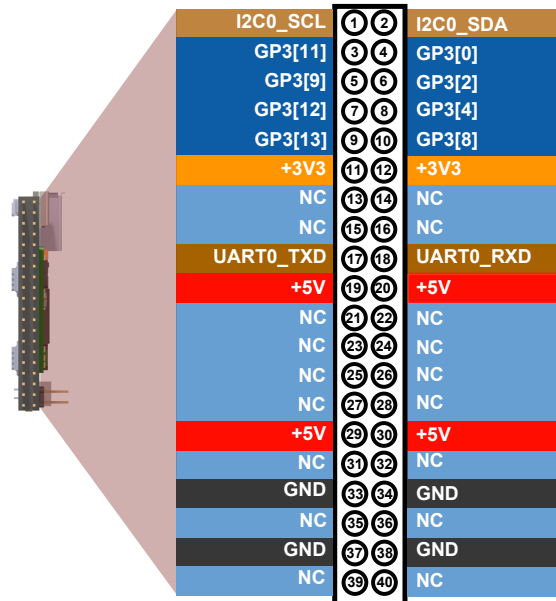


Abbildung 3.2: Pinout des EOMA-68-Connectors

Auf einige Schnittstellen, welche in der EOMA-68 Richtlinie vorgesehen sind musste verzichtet werden. Da beispielsweise der Ethernet PHY des OMAP-L138 SOM-M1 entfernt werden musste konnten keine Ethernet Signale auf den Stecker gelegt werden. Falls hohe Datenraten bei der Kommunikation zu erwarten sind, kann auf den high-speed USB 2.0 OTG Port der Flugsteuerung zurückgegriffen werden. Auch hier beträgt die Pegelspannung aller Ein- und Ausgänge 3,3V.

3.1.3 Receiver-Eingang

Tabelle 3.1 zeigt das Pinout des Receivers-Eingangs (X9). Da der Graupner-Receiver mit 5 V Pegel arbeitet wurden seine 3,3 V Eingänge durch einen Spannungsteiler 5V-verträglich gemacht.

Tabelle 3.1: Pinout Receiver-Eingang

Pin	Signalname
1	GND
2	+5V
3	TM64P0_IN12

3.1.4 I2C-Motortreiber

In Tabelle 3.2 wird das Pinout des I2C-Ports für die Motortreiber (X3) beschrieben. Dieser Stecker ist dafür vorgesehen die Motortreiber zu verbinden.

Tabelle 3.2: Pinout I2C-Motortreiber

Pin	Signalname
1	GND
2	I2C1_SCL
3	I2C1_SDA

3.1.5 UART-Debug-Port

Tabelle 3.3 zeigt das Pinout des UART-Debug-Ports (X1). Standardmäßig ist das Linux-System so konfiguriert, dass UART2 als Standard-Debug-Port verwendet wird ¹ [1]. Da dieser Port jedoch für andere Zwecke verwendet wird, musste auf UART1 als Debug-Port ausgewichen werden. Das Linux-System muss so umkonfiguriert werden, dass die Bootmeldungen, sowie die Standardkonsole auf UART1 ausgegeben werden.

Tabelle 3.3: Pinout UART-Debug-Port

Pin	Signalname
1	UART1_RXD
2	UART1_TXD
3	GND

3.1.6 Analoge Eingänge

Tabelle 3.4 zeigt das Pinout des Steckers X6. Er befindet sich auf der Rückseite der Flugsteuerung und enthält vier analoge Eingänge. Die Eingangsspannung sollte 2.25 V nicht überschreiben. [AN 470]

Tabelle 3.4: Pinout der Analogen Eingänge

Pin	Signalname
1	AI0
2	AI1
3	AI2
4	GND

¹ Abfragen der Bootargumente von *uBoot* mit `printenv` ergibt im Default-Zustand

```
...
bootargs=mem=32M console=ttyS2,115200n8 root=/dev/mmcblk0p2 rw rootwait ip=off
...
```

3.2 Inertiale Messeinheit

3.2.1 Funktionsweise

Die inertielle Messeinheit (*Inertial Measurement Unit*, **IMU**) wird zur Fluglagebestimmung des Fluggerätes. Sie besteht aus folgenden Sensoren:

- 3 Achsen Beschleunigungssensor
- 3 Achsen Drehratensensor
- 3 Achsen Magnetfeldsensor
- Barometrischer Drucksensor

Die Messwerte der Sensoren der **IMU** werden zusammen mit jenen eines **GPS**-Moduls zur Bestimmung von Orientierung und Position der Flugsteuerung herangezogen. Hierin werden optimale Orientierungswerte durch eine kluge Fusion der jeweiligen Sensorwerte durch numerische Algorithmen erzielt. Dabei werden Ansätze wie beispielsweise der Kalman Filter aus [22] verwendet.

3.2.2 Wahl der Sensoren

Drucksensoren

Um die Höhe des Fluggerätes zu bestimmen, wird der Druckunterschied zwischen dem Höhen- und dem Druck am Boden herangezogen. Dafür wird ein barometrischer Drucksensor verwendet. Tabelle 3.5 zeigt einige barometrische Drucksensoren im Vergleich [14] [4] [7]. Alle Sensoren haben als zusätzliches Feature einen Temperatursensor integriert, mit dem die Sensoren kompensiert werden können.

Tabelle 3.5: Barometrische Drucksensoren im Vergleich

Sensor	Hersteller	Auflösung	Relativdruck Genauigkeit	Messbereich
MS5611-01BA03	MEAS-SPEC	0.012 mbar	$\pm 0.5 / \pm 2.5$ mbar	450 - 1100 mbar
BMP180	Bosch	0.02 mbar	± 0.12 mbar	300 - 1000 mbar
MPL3115A2	Freescale	≈ 0.01 mbar	± 0.5 mbar	500 - 1100 mbar

Da die Höhe gemessen werden soll, ist die Auflösung von besonderem Interesse. Diese ist bei dem MS5611 und dem MPL3115A2 am besten und liegt auf den messbaren Höhenunterschied umgerechnet bei etwa 10 cm. Da der MS5611 bereits getestet wurde und verlässliche Werte liefert, fiel die Entscheidung auf diesen.

Beschleunigungs-/Drehraten-/Magnetfeldsensoren

Es gibt mittlerweile Sensor-**ICs**, welche 10 Sensor-Achsen in einem Gehäuse beherbergen:

- 3 Achsen Beschleunigungssensor

- 3 Achsen Drehratensensor
- 3 Achsen Magnetfeldsensor
- Temperatursensor

Hier werden die Sensoren BMX085 von Bosch-Sensortec [6] und MPU-9150 [13] von Invensense verglichen um eine Wahl zu treffen. Beide Sensoren können über I2C angesteuert werden und deren Gehäuse sind sehr kompakt gebaut. Die Tabellen 3.6, 3.7 und 3.8 zeigen die Sensitivität des Drehratensensors, des Beschleunigungssensor und des Magnetfeldsensors bezogen auf das LSB der jeweiligen Sensoren. Die Sensitivität der Drehratensensoren ist dabei bei dem BMX055 und dem MPU-9150 gleich gut. Jedoch ist die Sensitivität des Beschleunigungssensors und des Magnetfeldsensors des MPU-9150 höher. Da bereits Kalman-Filteransätze mit dem MPU-9150 erfolgreich getestet wurden und dabei gute Ergebnisse erzielt werden fiel die Wahl auf diesen Sensor.

Tabelle 3.6: Sensitivität Drehraten MPU-9150 und BMX055

Gyro Range	MPU-9150	BMX055
± 250 °/s	131 LSB/(°/s)	131.2 LSB/(°/s)
± 500 °/s	65.5 LSB/(°/s)	65.6 LSB/(°/s)
± 1000 °/s	32.8 LSB/(°/s)	32.8 LSB/(°/s)
± 2000 °/s	16.4 LSB/(°/s)	16.4 LSB/(°/s)

Tabelle 3.7: Sensitivität Beschleunigung MPU-9150 und BMX055

Acc Range	MPU-9150	BMX055
± 2 g	16384 LSB/g	1024 LSB/g
± 4 g	8192 LSB/g	512 LSB/g
± 8 g	4096 LSB/g	256 LSB/g
± 16 g	2048 LSB/g	128 LSB/g

Tabelle 3.8: Sensitivität MPU-9150 und BMX055

MPU-9150	BMX055
0.314 μ T/LSB	1 μ T/ μ T

Laut einem Gespräch mit Bosch-Sensortec, ist die Driftstabilität des Drehratensensor des BMX055 besser als jene des MPU-9150. Das kann bedeuten, dass der Bosch-Sensor, trotz der schlechteren Auflösung des Beschleunigungssensors, nach der Stabilisierung des Gyro-Drifts durch die Sensorfusionsalgorithmen, gute Werte liefert. Es wurden bereits Samples geordert um dies zu testen. Zusätzlich zu dem BMX055 erscheint der BNO055, welcher zusätzlich zu den 10 Sensorachsen einen Mikrocontroller enthält. Der Flashspeicher dieses Mikrocontrollers ist teilweise mit Sensorfusionssoftware beschrieben. Diese wurde seit zwei Jahren mit verbessert. Sobald die neuen Sensorfusionsalgorithmen erscheinen, wird der neue Sensor von Bosch getestet und mit dem MPU-9150 verglichen.

Falls die Alternativen zu dem MPU-9150 wesentlich bessere Werte liefern, werden diese in zukünft-

tigen Designs bevorzugt verwendet. Der BMX055 wird ohnehin bereits als redundanter Sensor auf dem Motortreiber-Board verbaut.

3.2.3 Orientierung der IMU-Sensoren

Folgende Grafik zeigt, die Orientierung des Beschleunigungs-, Drehraten und Magnetfeldsensors (MPU-9150). Außerdem ist die Position des MPU-9150 (IMU-Sensor) bezogen auf die Mitte be-
maßt.

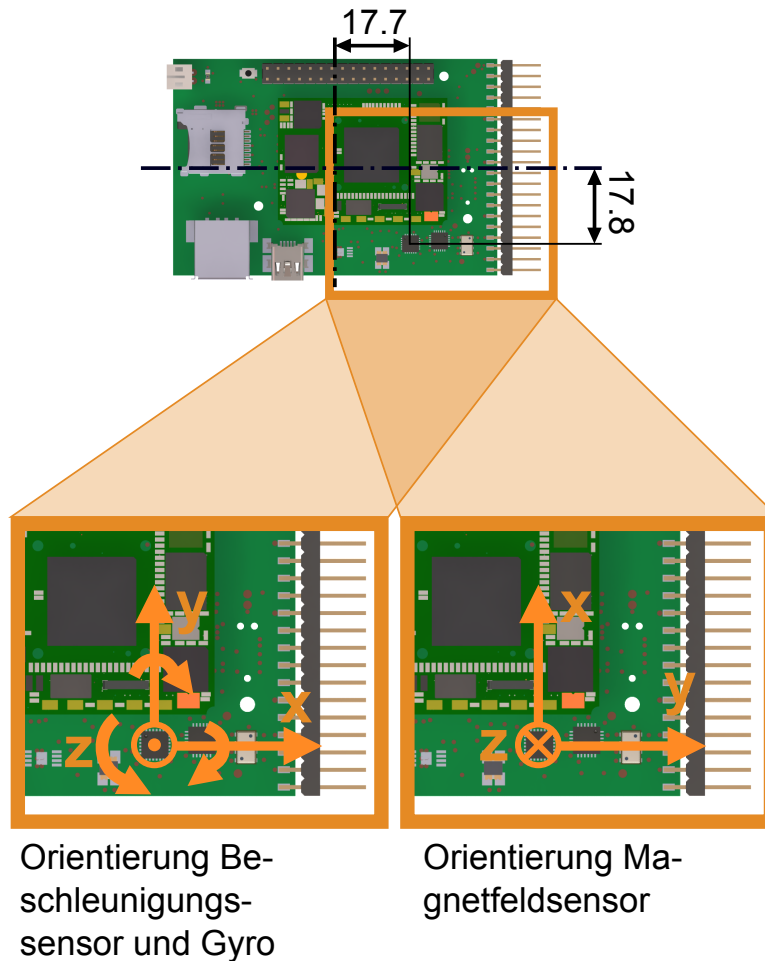


Abbildung 3.3: Orientierung der inertialen Messeinheit auf der Flugsteuerung

3.3 Abmessungen

Abbildung 3.4 zeigt die Abmessungen der Flugsteuerung, bemaßt in der Draufsicht. Außerdem sind die Positionen der Befestigungsbohrungen eingezeichnet und bezogen auf die linke untere Ecke bemaßt.

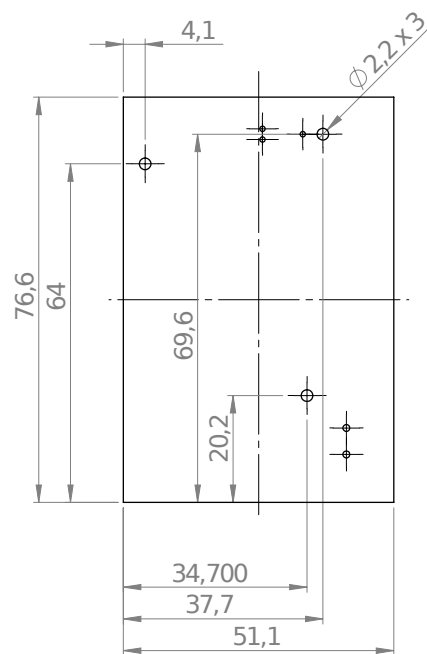


Abbildung 3.4: Außenabmessungen und Position der Bohrungen der Flugsteuerung

Technische Daten

4.1 Features

- Dual-Core **DSP** und **ARM**-Prozessor in einem Gehäuse
- Realtime-Betriebssystem für zeitkritische Aufgaben auf **DSP**
- Linux Board Support Package auf **ARM**-Controller beispielsweise für Schnittstellentreiber
- **USB 2.0 high-speed On-The-Go** Interface
- **USB 1.1 full-speed host** Interface
- **I2C**-, **SPI**-, **UART**-, **GPIO**-Ports, **GND**, **5V** und **3,3V** auf Breakout-Connector
- Teilweise Unterstützung der **EOMA-68** Richtlinie [9]
- Vier analoge Eingänge

4.2 Specs

- Abmessungen: **LxBxH: 75,6x51,1x50,0 mm**
- Gewicht: **30g**
- Spannungsversorgung: **5 V**
- Stromaufnahme: **200 mA**
- Prozessor: **OMAP-L138 Dual-Core ARM 926EJ-S** und **C6848 VLIW DSP, 375 MHz** [17]
- Speicher: **8MB Flash, 166 MHz DDR SDRAM, 64 oder 128 MB** [17]
- **IMU: MPU-9150, MS5611** [13], [14]

5.1 Signalübersicht und Überprüfung des Pinmultiplexing

5.1.1 TIs Pinmultiplexing Utility

Der OMAP-L138 Prozessor benutzt Pinmultiplexing um die Ausgangspins mit mehreren wählbaren Funktionen zu versehen. Um Kollisionen konkurrierender Signale durch Mehrfachbelegung von Pins zu vermeiden, stellt Texas Instruments ein Software-Tool namens “Pin Multiplexing Utility”¹ [15] zum Design der Pinbelegungen zu Verfügung. Dieses Tool wurde verwendet um zu ermitteln, welche Pin-Funktionen verwendet werden können und ob es Überschneidungen gibt. Dabei musste auch darauf geachtet werden, dass keine Pins verwendet werden, welche vom OMAP-L138 SOM-M1 intern vorgesehen sind. Dafür wurden hauptsächlich die Designunterlagen von LogicPD - *OMAP-L138 SOM SOM-M1 Hardware Spec*, sowie der *Schaltplan des OMAP-M1 SOM-M1* - beide verfügbar im User-Bereich der LogicPD Homepage [10], herangezogen.

Warum die Entscheidung auf die jeweiligen Pin-Funktionen fiel, wird in den folgenden Kapiteln beschrieben. Es werden auch Signale berücksichtigt, die nur intern auf dem SOM genutzt werden. Hier werden jedoch nur Signale berücksichtigt, die für die Verwendung der Flugsteuerung relevant sind.

5.1.2 I2C

Es werden auf der Flugsteuerung zwei I2C-Ports benötigt. Ein Port wird für die Ansteuerung der Motoren verwendet. Der andere I2C-Port ist für das Auslesen der IMU-Sensoren, die beide über I2C angesteuert werden, notwendig. Auf dem Board befinden sich zwei I2C Ports:

- **I2C0:** Wird auf dem OMAP-L138 SOM-M1 für die Kommunikation mit dem Powermanagement IC verwendet. Dieser ist für systemkritische Funktionen wie Reset und das Powersequencing auf dem SOM zuständig.
- **I2C1:** Wird auf dem OMAP-L138 SOM-M1 in der Pinmultiplexing-Konfiguration des Linux Systems standardmäßig als UART2 festgelegt. Die Signale dienen als Standard-Terminal.

¹ In diesem Rahmen wurde mit der *Pin Multiplexing Utility* in der Version 1.0 gearbeitet.

I2C1 wird für die Kommunikation mit den Motortreibern verwendet. Hierfür wird das Signal auf einen Stecker gelegt. Die Signal-Pins von **I2C1** haben bei dem OMAP-L138 zusätzlich die Funktion von **UART2**. Dieser Port dient dem Linux-System des OMAP-L138 **SOM-M1** als Standard-Konsole. Deshalb ist es hier notwendig zum einen die Pinmultiplexing-Funktionen des Linux Systems auf **I2C** umzustellen und zum anderem, in U-Boot ² einen anderen seriellen Port für die Ausgabe der Boot-Sequenz einzustellen.

I2C0 ist für die Kommunikation zwischen dem OMAP-L138 und dem Power-Management **IC** auf dem **SOM** zuständig. Diese Kommunikation ist systemkritisch. Da sowohl für die Kommunikation mit den Motortreibern, als auch für jene mit den Sensoren viel Buslast erwartet wird, wird auf die Nutzung des **I2C0** Ports für diesen Zweck verzichtet. Es soll verhindert werden, dass die systemkritische Kommunikation auf dem **SOM** durch zu viel Kommunikation auf dem Bus blockiert wird. Da für die Kommunikation mit den **IMU**-Sensoren noch ein **I2C**-Bus benötigt wird, jedoch alle verfügbaren Busse in Verwendung sind, wird der **IC** SC18IS600 von NXP verwendet. Dieser wird über **SPI** angesteuert und fungiert hier als Slave. Er stellt einen **I2C**-Master-Port zur Verfügung.

5.1.3 SPI

Für den SC18IS600 wird ein **SPI**-Port benötigt. Auf dem OMAP-L138 **SOM-M1** stehen zwei **SPI**-Ports zur Verfügung:

- **SPI0**: Konkuriert mit den **MII**-Signalen und wird auf dem **SOM** für die Kommunikation zwischen OMAP-L138 Prozessor und LAN8710 Ethernet **PHY** verwendet.
- **SPI1**: Von SPI1 ist als Default-Boot Quelle für den OMAP-L138 **SOM-M1** definiert. Ein serieller Flash-Baustein ist an **SPI1_CS0** angeschlossen

Da **SPI0** Standard Boot-Quelle ist und während des Bootvorganges von Linux verwendet wird, wird darauf verzichtet diesen für den SC18IS600 zu verwenden. Es soll verhindert werden, dass der **SPI**-Port für den **DSP** während des Bootvorganges des Linux-Systems nicht zugänglich ist. Dies hat sicherheitstechnische Gründe, da über diesen **SPI**-Port die Sensordaten erhalten werden. Falls das Linux System während des Fluges einen Software-Reboot durchführt, soll der **DSP** dadurch nicht gehindert werden den **SPI** Bus zu verwenden. Die Sensorwerte werden für die Fluglage-Regelung benötigt und haben damit systemkritische Funktion.

Stattdessen fiel die Entscheidung auf den **SPI1** Bus. Dieser wird für die Kommunikation zwischen OMAP-L138 Prozessor und dem LAN8710 Bus verwendet. Da auf die Verwendung der Ethernet Funktion auf dem Board verzichtet wird, kann der **SPI1** Port verwendet werden. Da der Ethernet **PHY** auf dem **SOM** nicht vom **SPI**-Port abgetrennt werden kann, wurde er abgelötet. Alternativ ist es möglich den **IC** durch einige 0 Ohm Widerstände von der IO-, Core-, und Versorgungsspannung abzutrennen, dies muss jedoch erst getestet werden. Es ist unklar, wie sich die **TTL** Ein-, und Ausgänge im unbestromten Zustand am Bus verhalten.

² Auf dem OMAP-L138 SOM ist standardmäßig der U-Boot Bootloader installiert um das Linux-System zu booten. U-Boot (*Universal Bootloader*) ist ein Bootloader, der vorwiegend auf eingebetteten Systemen zum Einsatz kommt, um den Kernel des verwendeten Betriebssystems in den Arbeitsspeicher zu laden. [5]

5.1.4 UART

UART2 ist standardmäßig der Debug Port des Linux Systems. Da dieses Signal mit dem I2C1 Port des OMAP-L138 Prozessor gemultiplext wird, muss hier auf **UART1** ausgewichen werden. Hierfür müssen die Einstellungen für U-Boot (Ausgabe der Boot-Meldungen), sowie die des Linux Systems (Standard-Konsole) angepasst werden.

5.1.5 Timer

Die Timer TM64P2_IN12 und TM64P3_IN12 werden auf einen Breakout-Connector gelegt. Bei beiden Signalen handelt es sich um Timer, die auf eine Event an den jeweiligen Pins reagieren können. Der Timer TM64P0_IN12 ist für die Auswertung des PPM-Signals des Receivers vorgesehen. Da genug Platz zur Verfügung steht wird zusätzlich der Timer TM64P1_IN12 auf den Stecker gelegt. Dieser kann zusätzlich wahlweise als Watchdog Timer verwendet werden.

Ähnlich wie die SPI0-Leitung werden auch die Timer-Pins mit den MDIO/MII-Signalen gemultiplext. Der Ethernet PHY vom Board entfernt wurden und kann somit nicht mehr mit den jeweiligen Pins interagieren. Ob es alternativ ausreicht den Ethernet PHY-IC nur von der Spannungsversorgung abzutrennen muss noch getestet werden.

5.1.6 MMC/SD

Für das Booten des Linuxsystems wird eine SD Flashspeicher Karte verwendet. Hierfür wird der MMC/SD0 Port verwendet. Die Überprüfung des Pinmultiplexing hat ergeben, dass die Verwendung dieses Signals nicht mit anderen kollidiert.

5.2 Versorgung

ICs, Sensoren, sonstiges:

Alle ICs, sowie die Micro-SD-Card, werden mit 3,3V versorgt und arbeiten mit einer Pegelspannung von 3,3V. Sie können dabei wahlweise über die Pegelspannung (M_3V3_IO) des SOM oder über einen auf dem Board befindlichem Spannungsregler versorgt werden, je nachdem ob die 0-Ohm Widerstände R10, R11 und R41 oder R40 bestückt werden. Es wird jedoch nicht empfohlen das M_3V3_IO Netz sehr zu belasten. Bei der Wahl des 3,3 V Spannungsreglers wurde darauf geachtet, dass dessen Spannung nicht zu weit von jenen 3,3 V des 3.3V_or_1.8V Netzes des Omap-L138 SOM-M1 abweicht. Die Schaltung wird in Abbildung 5.1 dargestellt.

OMAP-L138 SOM-M1

Das SOM-L138-Modul hat folgende Spannungseingänge:

- **5V:** Der 5V Eingang ist der Hauptspannungsanschluss. Sobald 5V angeschlossen sind, wird diese Spannungsquelle allen anderen Eingängen bevorzugt. Wenn die hier die 5V-Spannung ordnungsgemäß vorhanden ist, werden der TPS65070 PMIC und der OMAP-L138 Prozessor sofort hochfahren und laufen. Über diese 5V wird die Flugsteuerung über die 5V am Eingang der Flugsteuerung versorgt.

- **USB0_VBUS:** USB0_VBUS ist eine optionale Spannungsquelle. Sobald eine Spannung an USB0_VBUS-Eingang vorhanden ist, wird das Power-Management IC TPS65070 diese Spannung bevorzugt verwenden. Alternativ zu den 5V am Eingang kann die Flugsteuerung über USB0_VBUS versorgt werden. Hierfür muss der 0 Ohm Widerstand R42 bestückt werden (siehe Abbildung 5.1). Dies ist nützlich, wenn die Flugsteuerung für Debugzwecke am Schreibtisch verwendet wird.
- **MAIN_BATT_IN:** Der MAIN_BATT_IN-Eingang ist dafür vorgesehen eine Lithium-Ionen Batterie anzuschließen. Der TPS65070 PMIC wird das Board von dieser Spannung nur dann versorgen, wenn weder am 5V-Eingang, noch am USB0_VBUS-Eingang eine Spannung anliegt. Wenn eine passende Spannung am MAIN_BATT_IN-Eingang anliegt, werden der TPS65070 PMIC und der OMAP-L138 Prozessor nicht sofort hochgefahren. Erst muss am PMIC_PB_IN Pin kurzzeitig eine Spannung angelegt werden. Der TPS65070 PMIC kann die an MAIN_BATT_IN angeschlossene Batterie sowohl über den 5V- als auch über den USB0_VBUS-Eingang laden. **Dieser Spannungseingang wird in der Flugsteuerung nicht benutzt.**
- **VRTC_BATT:** Der VRTC_IN-Eingang versorgt das onboard RTC (Real-Time-Clock) Modul. Um den Systemclock zu erhalten, sollte dieser Anschluss immer angeschlossen werden. Er wird mit 3,3 V versorgt.

Außerdem verfügt die Flugsteuerung über den Spannungsausgang **3.3V_or_1.8V**. Es wird empfohlen diesen Ausgang für Pegelspannungen zu verwenden. Auf der Flugsteuerung wird dieser Ausgang zum **M_IO_3V3**. Da die Sensoren auf der Flugsteuerung sehr wenig Strom brauchen, ist es denkbar, dass diese anstatt über das 3.3V Netz, über die Spannung **M_IO_3V3** versorgt werden. Dafür müssen die 0-Ohm Widerstände R10, R11 und R41 bestückt und der 0-Ohm Widerstand R40 entfernt werden (siehe Abbildung 5.1).

Verbrauch:

Laut Datenblatt sollte das OMAP-L138 SOM-M1 im Betrieb 220 mA benötigen. Um den Verbrauch zu testen, wurde das Evaluationsboard ohne Displayboard betrieben. Dabei war nur ein Schnüffelstück angeschlossen um den Bootnachrichten in einem Terminalprogramm sehen zu können. Dabei ergab sich jedoch ein Verbrauch von 300 mA.

5.3 Clocks

Das OMAP-L138 SOM-M1 ist mit zwei Quarzen ausgestattet. Einer der Quarze generiert den Systemtakt für den Prozessor und die Peripherie. Der zweite Quarz ist für das Real Time Clock Modul des L138 zuständig.

- **24 MHz:** Der Omap-L138 Prozessor beinhaltet on-chip Phase Locked Loops (acsppll), die aus dem 24.000 MHz Quarz die Taktfrequenz für den Prozessorkern und die Peripherie erzeugen. Die maximale Prozessorfrequenz beträgt 300 MHz. Die PLL0 ist über **J3.18: uP_OBSCLK** vom SOM herausgeführt. Dieser Pin wird mit einem Testpunkt versehen (TP*).
- **32,768 MHz:** Der Omap-L138-Prozessor verfügt über ein Real Time Clock Modul (RTC), welches über einen 32.768 MHz Quartz versorgt wird. Diese dient als Zeitreferenz auf dem

3,3V Supply Voltage Regulator

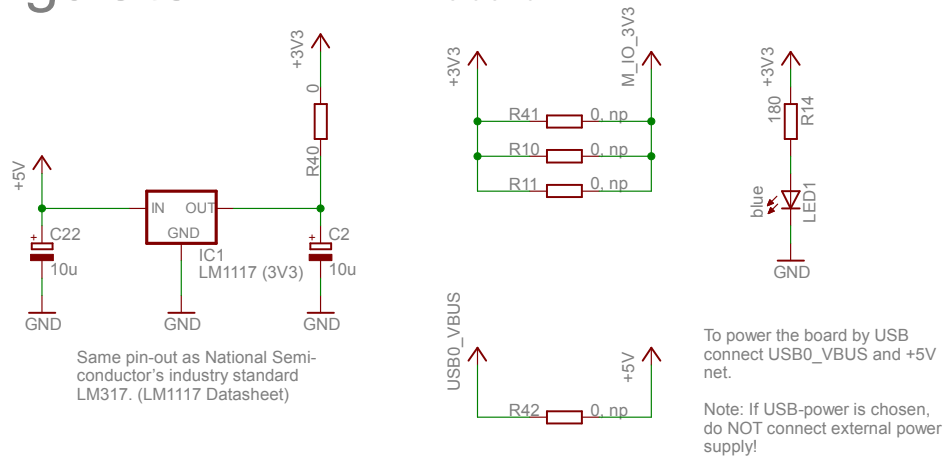


Abbildung 5.1: Schaltung der Spannungsversorgung der Flugsteuerung

Omap-L138. Das **RTC** Modul wird über **J2.64: VRTC_IN** versorgt. Auf der Flugsteuerung heisst dieser Pin **uP_RTC_BATT**. Er wird mit 3,3 V versorgt. Wahlweise kann man einen 0 Ohm Widerstand auslöten und das Board über Testpunkte mit einer Lithium-Ionen-Knopfzelle versorgen.

Da das Omap-L138 **SOM-M1** bereits mit allen notwendigen Taktquellen ausgestattet ist und für die Peripherie keine zusätzlichen Taktquellen notwendig sind, befinden sich keine Quarze oder Quarz-Oszillatoren auf der Flugsteuerung.

5.4 Reset

Das OMAP-L138 **SOM-M1** Modul hat bereits einen internen Pull-Up Widerstand am **uP_RESETh** Signal. Deshalb wird hier kein Pull-Up Widerstand mehr benötigt. Es wird empfohlen einen 0.1 μF Kondensator in der Nähe des Reset Pins zu platzieren um durch **ESD** verursachte Resets zu reduzieren [3]. Außerdem wird ein Software Reset durch einen Transistor, der durch einen **I/O (GP8_[11])** des OMAP-L138 geschaltet werden kann, ermöglicht. Die Schaltung wird in Abbildung 5.2 dargestellt.

Reset

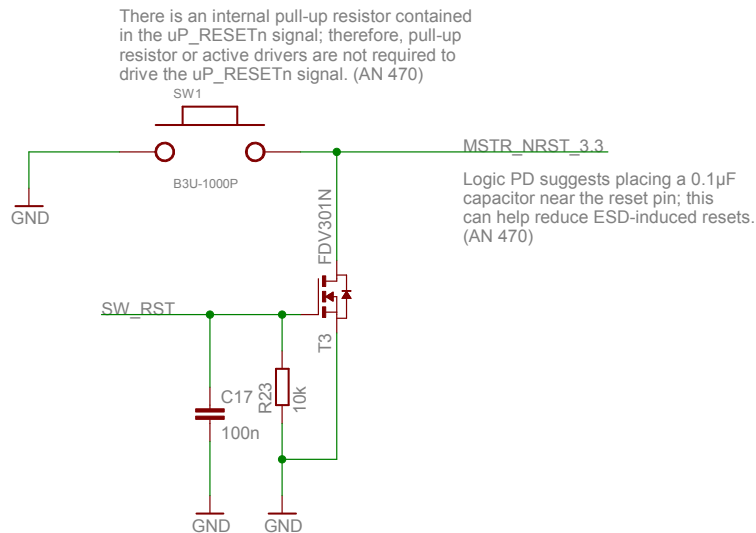


Abbildung 5.2: Resetschaltung

5.5 Testpunkte

Die Flugsteuerung stellt folgende Testpunkte zur Verfügung:

- *BOOT[1], BOOT[2], BOOT[3], BOOT[4]*
- *I2C_MS5611_SCL, I2C_MS5611_SDA*
- *TM64P1_IN12*
- *3.3_1.8_IO_VOLT_SEL*
- *UP_OBSCLK*
- *I2C0_SDA, I2C0_SCL*
- *SPI1_CLK, SPI1_SOMI, SPI1_SIMO*
- *RESETOUT_3.3_1.8*
- *M_IO_3V3*
- *SPI1_SCS[4]/UART2_TXD/I2C1_SDA, SPI1_SCS[5]/UART2_RXD/I2C1_SCL*
- *ES_DA, ES_CL*
- *~EN1 und ~EN2 (TPS2042, IC7)*
- *GND*

5.6 User LEDs

Die Flugsteuerung verfügt über zwei User-LEDs:

- **LED1:** LED1 ist eine blaue LED, welche anzeigt dass die 3,3V Spannung anliegt.
- **LED2:** LED2 ist eine zweifarbig LED (rot und grün). Damit lassen sich drei Farben darstellen: Rot, grün - und durch das Mischen beider Farben gelb. Diese LED kann als Statusanzeige verwendet werden.

5.7 Debug Interface

Über das Debug-Interface kann ein korrupter Flash-Speicher wiederhergestellt, eine Echtzeitanwendung debugged, oder ein DSP-Projekt entwickelt werden. Das JTAG-Interface besteht aus den Signalen **TDI**, **TMS**, **TCK**, **TDO**, **nTRST**, **RTCK**, **EMU0** und **EMU1**. Diese Signale werden auf Pads gelegt, welche über einen speziellen Stecker von Tag-Connect angeschlossen werden können. Es wurde der 10-polige Stecker **TC2050-IDC-NL** in Verbindung mit dem Adapter **TC-C2000** gewählt (siehe Abbildung 2.2). Der Adapter TC-C2000 zieht EMU0 und EMU1 durch Pull-Ups auf VCC. Außerdem konnten durch den Adapter einige Pins eingespart werden indem einige GND-Leitungen auf eine einzelne zusammengefasst werden und das Signal EMU_STS auf GND gelegt wurden. Dadurch ergibt sich ein sehr kleines Footprint. Durch den Debugstecker kann der OMAP-L138 Prozessor über die JTAG Schnittstelle mit dem XDS100v2-Debugger angesprochen werden.

Der XDS100v2 ist ein kostengünstiger JTAG-Emulator, der von Zulieferfirmen von Texas Instruments hergestellt wird. Er ist eine Weiterentwicklung des XDS100 von Spectrum Digital [20]. Abbildung 5.3 zeigt den Debugger. Mit ihm lassen sich JTAG-Interfaces von Texas Instruments Hardware ansprechen. Es ist kompatibel mit der Code Composer Studio Entwicklungsumgebung. Eigentlich handelt es sich bei dem XDS100 JTAG Emulator um ein Reference Design, das man auf der eigenen Hardware bestücken kann, oder als verwendbare Hardware kaufen kann. In diesem Fall wird eine fertige Hardware verwendet.

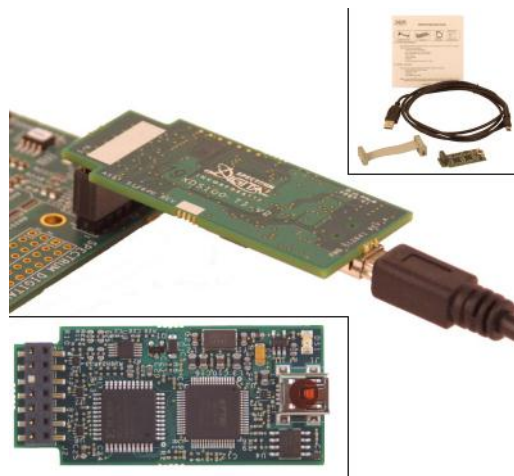


Abbildung 5.3: XDS100v2 von Spectrum Digital [20]

Der XDS100 ist etwas langsamer als die XDS510 und XDS560 Emulatoren. Das heißt, dass Programm- und Datendownloads sowie das Steppen durch C-Code beim Debuggen länger dauert. Dafür ist der XDS100 kostengünstiger. [20]

5.8 Sensoren IMU

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben besteht die **IMU** aus folgenden Sensoren

- **MPU-9150:** 3 Achsen Beschleunigungs-, 3 Achsen Drehraten-, 3 Achsen Magnetfeld- und Temperatursensor
- **MS5611:** Hochpräzises Drucksensormodul

Beide Sensoren werden über **I2C** versorgt. Da jedoch kein freier **I2C**-Port des OMAP-L138 **SOM-M1** zur Verfügung steht (siehe Kapitel 5.1) wurde ein freier **SPI** Port in Verbindung mit einem **SPI-I2C** Converter verwendet (**SC18IS600, NXP**). An dem von diesem **IC** zur Verfügung gestellten **I2C**-Port werden der **MPU-9150** und der **MS5611** betrieben. Alternativ kann das Signal des **MS5611** auch direkt an die **I2C**-Ausgabe des **MPU-9150** angehängt werden. Hierfür müssen die 0-Ohm Widerstände **R19** und **R24** entfernt und die 0-Ohm Widerstände **R30** und **R31** bestückt werden.

5.9 USB

Das Omap-L138 **SOM-M1** unterstützt einen **USB 1.1 full-speed** Port (**USB1**) und einen **USB 2.0 OTG** Port (**USB0**). Deshalb befinden sich auf der Flugsteuerung

- ein **USB 2.0 OTG Port** Kann sowohl als Master als auch als Host fungieren. Außerdem kann über ihn die Flugsteuerung versorgt werden (z.B. bei der Programmierung).
- ein **USB 1.1 full-speed Port:** Hier können **USB**-Geräte an die Flugsteuerung angeschlossen werden. Beispielsweise kann hier ein **USB-Ethernet** Converter angeschlossen werden um über *telnet* auf das Board zuzugreifen.

Der **TPS2042** Controller von **TI** schaltet die 5V Spannung auf die **USB**-Ports, je nachdem ob das Board gerade als Host fungiert. Die Signale **USB0_PWR_EN** und **USB1_PWR_EN** (**USB0_DRVVBUS**, am OMAP L138 Prozessor) schalten die Spannungen entsprechend auf die **USB**-Ports. (Siehe: **TMS320C674x/OMAP-L1x Processor Universal Serial Bus 2.0 (USB2.0) Controller - USER GUIDE**) Das Signal **UHPI_HRDY**, wird von den Over-Current Ausgängen des **TPS2042** geschaltet und regelt den Zugriff auf das Host Prozessor Interface. Sobald der Strom über einen bestimmten Wert steigt, begrenzt der **TPS2042** auf einen Maximalstrom. Wenn ein Kurzschluss auftritt und die Temperatur über einen bestimmten Wert steigt, schaltet der **TPS2042** ab und schaltet erst wieder durch, wenn die Temperatur unter einen bestimmten Wert sinkt.

Da an **USB0** ein Host angeschlossen werden kann, kann die Schaltung über **USB0** versorgt werden. Deshalb wird die Spannung an **USB0** auf den Eingang **USB_VBUS** gelegt. Dies ist ein optionaler Spannungseingang, über den das **SOM-L138** versorgt wird, wenn am 5V-Eingang nichts anliegt. Um **USB0** als Spannungsversorgung benutzen zu können müssen das 5V Netz und das

USB_VBUS Netz verbunden werden. Hierfür muss der 0 Ohm Widerstand R42 bestückt werden (siehe Abbildung 5.1). Wird das Board über **USB** versorgt, ist darauf zu achten, dass keine externe Spannungsversorgung angeschlossen wird.

Die Leitungen D+/D- Signale der jeweiligen **USB**-Ports sind differentielle Signale und deren Leiterbahnen sollten deshalb parallel geroutet werden. Außerdem sollten sie mit einer Impedanz von 90 Ohm über eine Ground Plane geroutet und möglichst kurz gehalten werden. [USB_AN], [3]. Dies wird in Kapitel 6.3 beschrieben.

5.10 Micro SD-Card

Die **SD**-Karte ist an den **Multimedia Card (MMC)/Secure Digital SD Card Controller** des OMAP L138 angeschlossen [18]. Entsprechend dem nativem **SD**-Karten-Protokoll [16] sind die Signale wie folgt angeschlossen:

- **CLK:** SD0_CLK
- **CMC:** SD0_CMD
- **DAT:** SD0_DATA0; SD0_DATA1; SD0_DATA2 SD0_DATA3

Ist das Signal **Write Protect (WP)** vorhanden, muss es an **uP_EMIFA_A17** angeschlossen werden. Wird das **Card Detect (CD)** Signal verwendet, muss es an **uP_EMIFA_A16** angeschlossen werden. [3]

- Da hier eine Micro **SD**-Card verwendet wird, ist das **Write Protect** Signal nicht vorhanden und wird deshalb auf **GND** gelegt
- Der verwendete **SD**-Card Halter unterstützt das Signal **Card Detect** (siehe Abbildung 5.4). Ein Kontakt zwischen zwei Pins wird geschlossen sobald eine **SD**-Karte eingesteckt wird. Einer dieser beiden **CD**-Pins wird auf Masse gelegt und der Andere wird mit **uP_EMIFA_A16** verbunden, damit dieses auf Low gezogen wird sobald eine **SD**-Karte eingesteckt wurde.

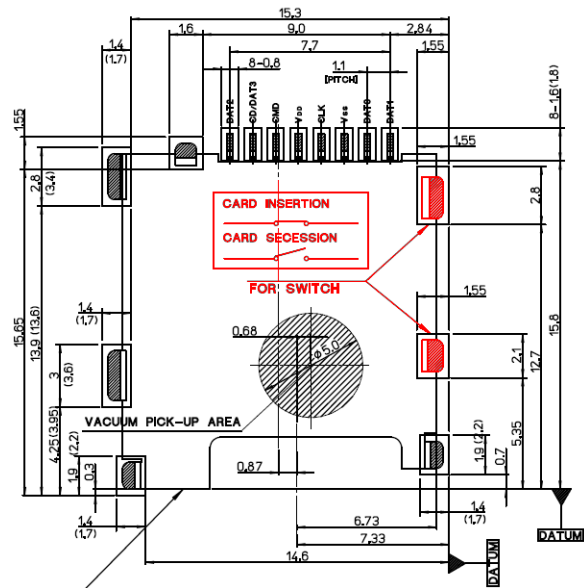


Abbildung 5.4: Molex SD-Kartenhalter (Art.Nr.49225-0821)

6.1 Aufbau der Lagen

Das PCB der Flugsteuerung besteht aus 4 Lagen. Deren Belegung wird in Abbildung 6.1 dargestellt.

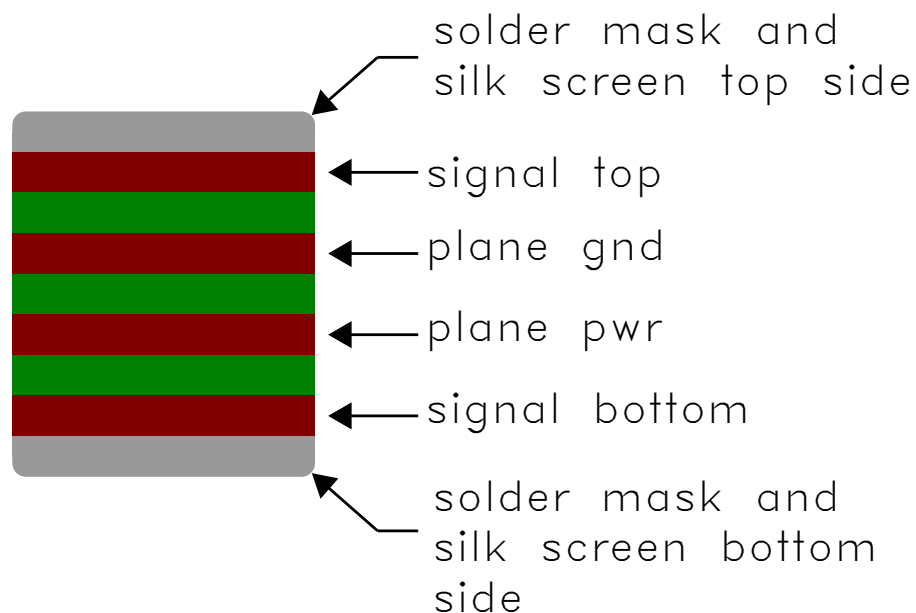


Abbildung 6.1: Aufbau der Lagen der Flugsteuerung

Die Signallagen wurden auf die äußeren Lagen gelegt. Dies hat den Vorteil dass sie noch erreichbar sind und somit Layoutfehler ausgebessert werden können. Außerdem gibt es Leitungen auf dem TOP-Layer welche impedanzangepasst verlegt werden (siehe Kapitel 6.3). Hier ist ein möglichst geringer Abstand des Signallayers zum GND-Layer ohne Zwischenlayer nötig [2].

6.2 Toleranzen

Die **Leiterbahnbreite** und die **Abstände** zwischen Leiterbahnen wurde auf mindestens **5 mil** festgesetzt. Laut dem Leiterplattenhersteller (*Hofmann Leiterplatten*) ist diese Toleranz bei einer **CU-Auflage** von **25 µm** machbar. Abbildung 6.2 zeigt den Aufbau einer von *Hofmann Leiterplatten* hergestellten Leiterplatte.

Mit dem Wissen, dass die Dicke der Leiterplatte insgesamt 1,5 mm, sowie die Dicke der **CU-Auflage** 0,25 µm beträgt, kann aus den Maßen von Abbildung 6.2 der Abstand zwischen Signal- und **GND-Layer** berechnet werden:

$$H = \frac{(1,5 - (0,025 \cdot 2 + 0,035 \cdot 2 + 0,710))}{2} \text{mm} \approx 0,32 \text{mm} \hat{=} 12,6 \text{mil}$$

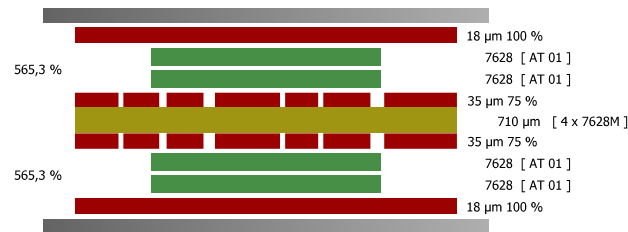


Abbildung 6.2: Schichtdicken einer vierlagigen Leiterplatte von *Hofmann Leiterplatten*

Die **Innenbohrdurchmesser der Vias** beträgt mindestens **0.26 mm**. Diese kleinen Durchmesser mussten gewählt werden um genügend Platz unter den Steckern des **SOMs** zu haben. Wären größere Durchmesser gewählt worden, hätte es Überschneidungen gegeben. Laut dem Leiterplattenhersteller, *Hofmann Leiterplatten*, stellen jedoch Bohrdurchmesser von bis zu 0.2 mm kein Problem dar.

6.3 USB

Die USB-Leitungen müssen als differentielle Leitungspaare mit einer Impedanz von 90 Ohm verlegt werden [2]. Folgende Formel zeigt wie sich die Impedanz aus den Abmessungen der Leiterplatte berechnet:

$$Z_{diff} = 2Z_0(1 - 0.48e^{-0,96S/H})$$

$$Z_0 = (87/(\epsilon_r + 1,41)^{0,5}) \ln(5,98H/0,8W + T)$$

Tabelle 6.1: Berechnung der Impedanz von Differenziellen Leitungen

Variable	Beschreibung
Z_{diff}	Differenzielle Impedanz von zwei parallelen Leiterbahnen auf einer Signallage
Z_0	Impedanz einer Leiterbahn auf einer Signallage
W	Breite einer Leiterbahn
H	Abstand der Leiterbahn zur GND-Lage
T	Trace Thickness
S	Abstand zwischen den differenziellen Leiterbahnen
ϵ	Relative Permeabilität des Platinenmaterials (FR4 ≈ 4.5)

Setzt man die Werte aus Kapitel 6.2 in diese Formel ein Berechnet sich die Impedanz zu:

$$Z_{diff} = 128\Omega$$

6.4 Footprint OMAP-L138 SOM-M1

Abbildung 6.3 zeigt die Vorgaben für die Platzierung der Stecker für das OMAP-L138 SOM-M1. Diese wurden im Layout eingehalten.

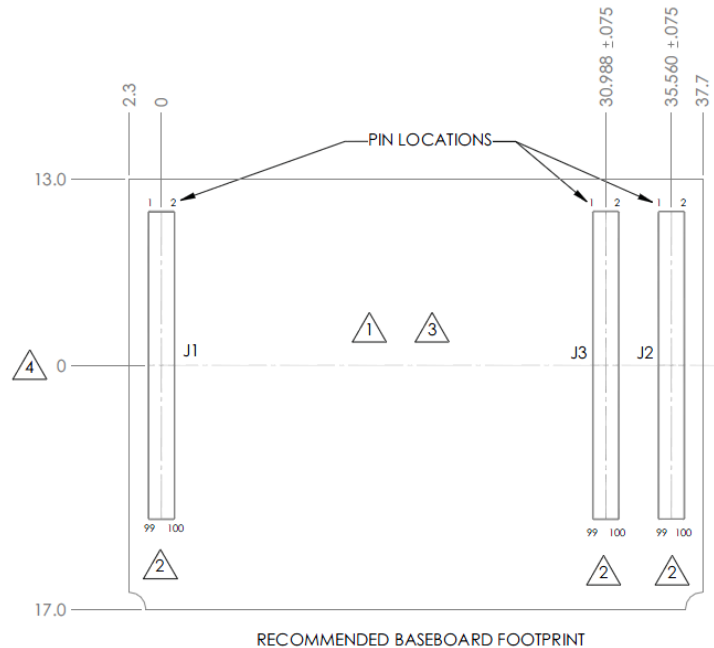


Abbildung 6.3: Footprint des OMAP-L138 SOM-M1

Um sicherzugehen, dass die Stecker während der Layout-Phase nicht versehentlich verschoben werden, wurde eine Eagle-Library für das OMAP-L138 SOM-M1 erstellt, welche alle drei Stecker mit den in Abbildung 6.3 dargestellten Abständen enthält.

6.5 Footprint JTAG Debugger

Abbildung 6.4 zeigt die Abmessungen des Tag-Connect Steckers *TC2050-IDC-NL*. Diese wurden beim Layout eingehalten. Außerdem wurde darauf geachtet, dass keine Bauteile zu nah an dem Stecker platziert wurden. Die Kontakte befinden sich aus Platzgründen auf der Rückseite des Boards. Im Vergleich zu anderen Steckern, zeichnet sich das Footprint von Tag-Connect durch seine geringen Abmessungen aus.

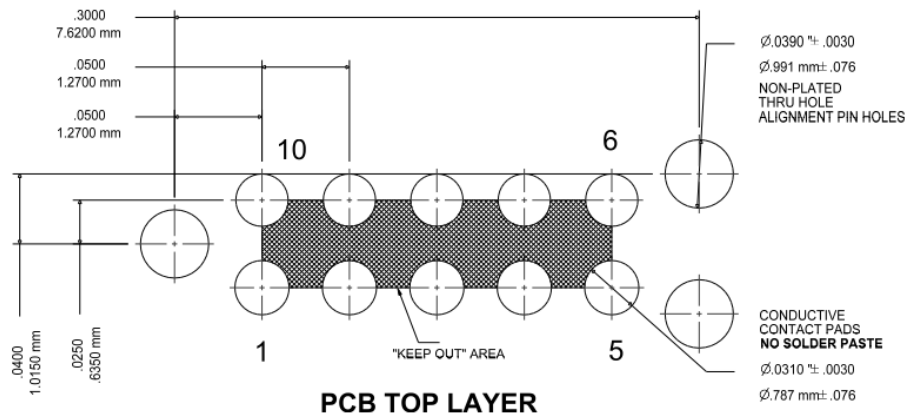


Abbildung 6.4: Footprint des Tag-Connect Debug-Steckers [12]

Außerdem wurde beim Layout des Steckers darauf geachtet, dass die Layoutvorgaben von Tag-Connect, welche in Abbildung 6.5 dargestellt sind, eingehalten werden.

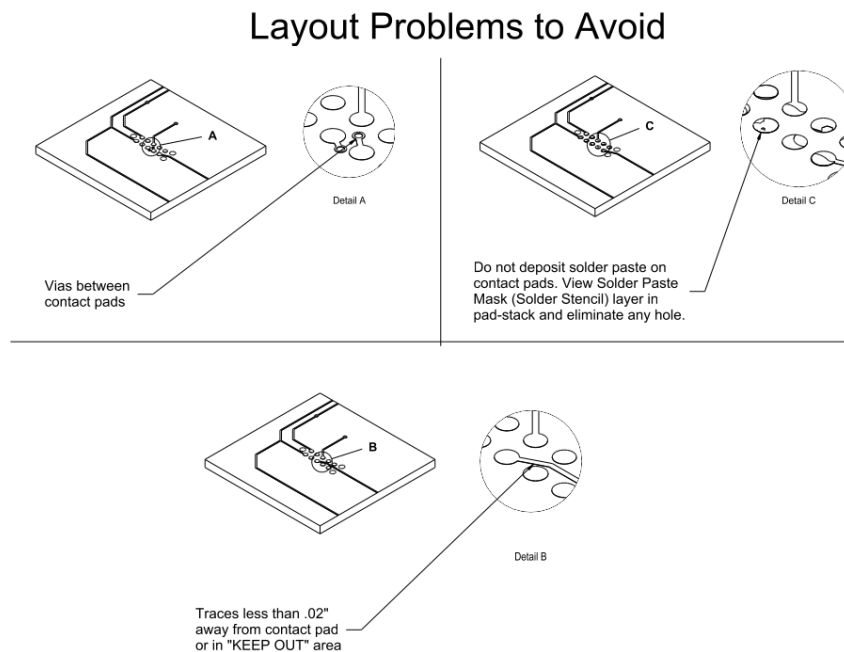


Abbildung 6.5: Layoutvorlagen von Tag-Connect [12]

Ausblick

Es lies sich bei Tests nicht verhindern, dass ein neues Booten des Linux-Systems dazu führt, dass ebenfalls das Echtzeitsystem neu bootet. Das bedeutet, dass ein Abstürzen des Linux-Systems dazu führen würde, dass die zeitkritischen Anwendungen des Echtzeitsystems ebenfalls abstürzen würden. Es ist jedoch aus Sicherheitsgründen nicht akzeptabel, dass das Echtzeitsystem durch einen Fehler im Linuxsystem abstürzt. Das würde zu einem Absturz des acspuav führen.

Da es nicht möglich war, die Linux-Anwendung komplett von der DSP-Anwendung zu trennen, wurde entschieden alle zeitkritischen Algorithmen der Flugregelung auf die Motortreiber auszulagern. Hier steht ein 32-Bit-Controller zur Verfügung, dessen Ressourcen ausreichen um jene Algorithmen zu ausführen zu können.

Stückliste

Bill of Materials

Flight Control for Quadcopter

Model Number & Rev	Author
FlightControl Rev A	Andreas Gschossmann

Contact

Andreas Gschossmann

Sensorik-Applikationszentrum (SappZ)

Telefon: +49 (941) 943 9848

Web: <http://www.sappz.de>

Part Number	Rev	Qty	Ref Des	Description	Distributor	Distributor Part Number
		1	C1	CAP, CERAMIC, 2n2, 50V, X7R, 0603	RS-COMPONENTS	464-6492
		2	C2, C22	CAP, TANTALUM, 10u, 6,3V	RS-COMPONENTS	464-9069
		1	C18	CAP, CERAMIC, 4u7, 25V, X5R, 0805	RS-COMPONENTS	723-6057
		1	C4	CAP, TANTALUM, 22u, 6,3V	RS-COMPONENTS	464-9249
		14	C3, C5, C6, C7, C11, C12, C13, C15, C16, C17, C19, C20, C21, C23	CAP, CERAMIC, 100n, X7R, 0603	RS-COMPONENTS	698-3263
		2	C8, C14	CAP, TANTALUM, 150UF, 10V, 6032	RS-COMPONENTS	547-9546
		1	C9	CAP, CERAMIC, 10n, X7R, 0603	RS-COMPONENTS	698-3257
		1	D1	TVS Diode, 3.3 V, SOD323	RS-COMPONENTS	770-4813
		1	IC1	LM1117, 800mA LDO Linear Regulator, 3.3V	RS-COMPONENTS	535-8635
		1	IC2	MPU-9150, 9 axis IMU Sensor	SCANTEC	MPU-9150
		1	IC3	SC18IS600IBS, SPI to I ² C-bus interface	MOUSER	771-SC18IS600IBS,128
		1	IC4	MS5611, pressure sensor	QUANTEC-NETWORKS	12637
		2	IC5, IC6	TPD2E001, low capacitance 2-channel ±15-kV, ESD-protection array for high speed data interfaces	RS-COMPONENTS	709-9050
		1	IC7	TPS2042, DUAL POWER-DISTRIBUTION SWITCHES	RS-COMPONENTS	423-090
		1	JP1, JP2, JP3			
		1	LED1	LED, blue, clear, 0805	RS-COMPONENTS	692-0953
		1	LED2	LED, bicolor, red/green, clear	RS-COMPONENTS	419-053
		1	P1	JST B2B-PH-K-S(LF)(SN), CONNECTOR HEADER, MALE	RS-COMPONENTS	546-8883

Part Number	Rev	Qty	Ref Des	Description	Distributor	Distributor Part Number
		14	R1, R2, R3, R4, R7, R8, R9, R17, R18, R20, R23, R26, R27, R43	RESISTOR, 10k Ohm, 0.1W, $\pm 0.1\%$, 0603	RS-COMPONENTS	566-890
		6	R5, R6, R12, R19, R21, R24	RESISTOR, 0 Ohm, 0.1W, $\pm 5\%$, 0603	RS-COMPONENTS	378-205
		7	R10, R11, R13, R30, R31, R33, R41	RESISTOR, 0 Ohm, 0.1W, $\pm 5\%$, 0603, np	RS-COMPONENTS	378-205
		3	R14, R44, R45	RESISTOR, 180 Ohm, 0.1W, $\pm 5\%$, 0603	RS-COMPONENTS	721-8097
		4	R15, R16, R25, R29	RESISTOR, 100 Ohm, 0.1W, $\pm 0.1\%$, 0603	RS-COMPONENTS	566-339
		1	R22	RESISTOR, 0.020 OHM, 1/4W, 1%, 1210	RS-COMPONENTS	566-339
		1	R28	RESISTOR, 470 OHM, 0.1W, 0.1%, 0603	RS-COMPONENTS	566-547
		1	R32	RESISTOR, 100k OHM, 0.1W, 0.1%, 0603	RS-COMPONENTS	661-8767
		4	R34, R35, R36, R37	RESISTOR, 4k7 OHM, 0.1W, 0.1%, 0603	RS-COMPONENTS	661-8714
		1	R40	RESISTOR, 0 Ohm, 0.1W, 1%, 0805	RS-COMPONENTS	223-0146
		1	R42	RESISTOR, 0 Ohm, 0.1W, 1%, 0805, np	RS-COMPONENTS	223-0146
		1	SW1	B3U1000P, Ultra Small Tactile Switch	RS-COMPONENTS	419-867
		2	T1, T2, T3	FDV301N, N-Channel MOSFET, 25V, 0.5A, SOT-23	RS-COMPONENTS	354-4907
		1	T3	FDV301N	RS-COMPONENTS	354-4907
		3	J1, J2, J3	Hirose DF40C-100DS-0.4V(51)	MOUSER	798-DF40C100DS0.4V51
		1	U1	TPS2042BDGN	RS-COMPONENTS	423-090
		3	X1, X3, X9	53261-03	RS-COMPONENTS	542-7107
		1	X2	MICROSD_SD_MODE	RS-COMPONENTS	756-9578
		1	X2	Molex 49225-0821, Micro SD-Card Connector	RS-COMPONENTS	756-9578
		1	X4	USB-AB Connector	RS-COMPONENTS	515-2027
		1	X7	USB-A Connector	RS-COMPONENTS	718-7214

Schaltplan

Schematic

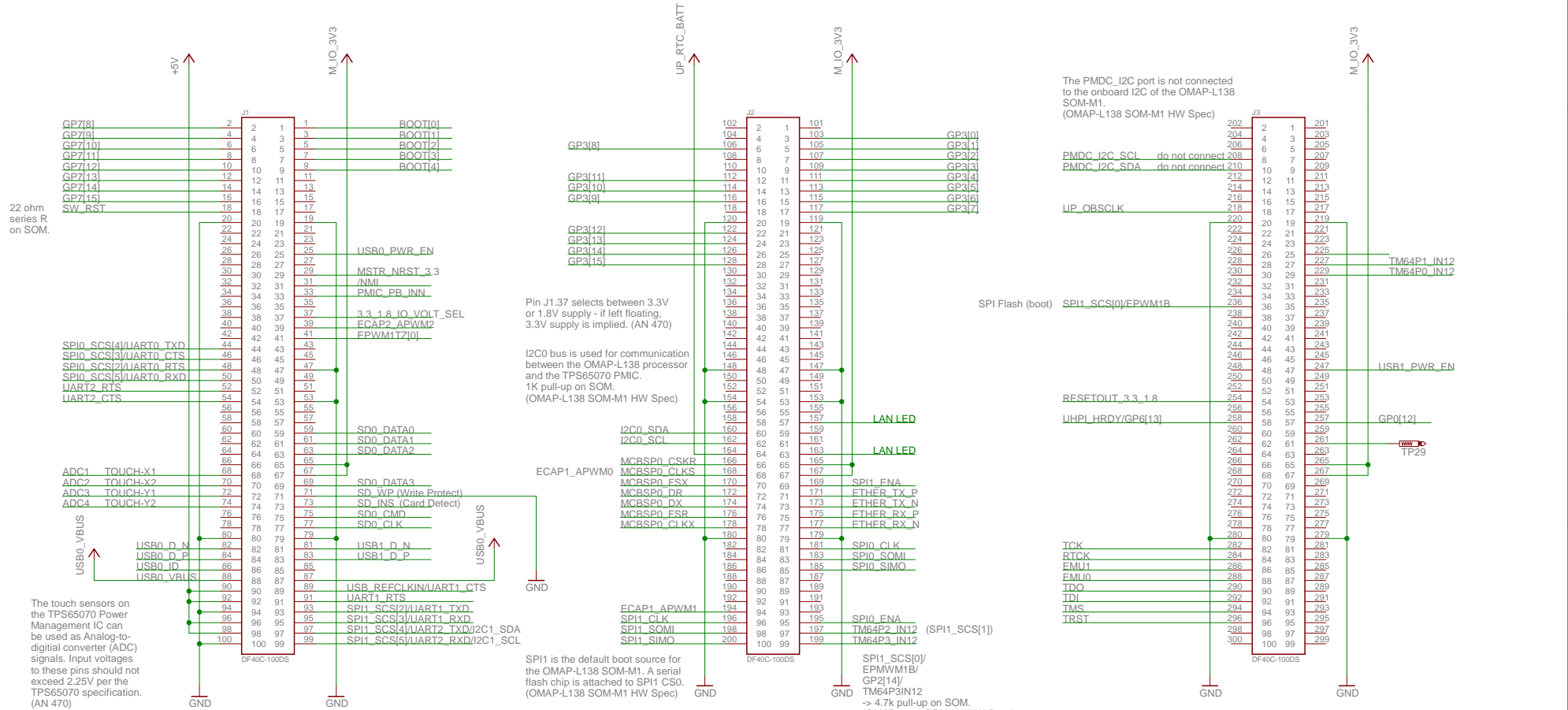
Flight Control for Quadcopter

Model Number & Rev	Author
FlightControl Rev A	Andreas Gschossmann

Contact

Andreas Gschossmann
Sensorik-Applikationszentrum (SappZ)
Telefon: +49 (941) 943 9848
Web: <http://www.sappz.de>

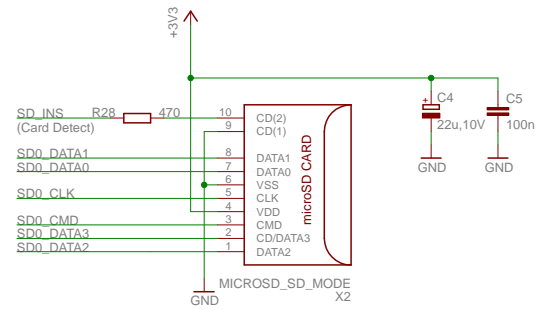
L138-SOM-CONNECTORS



NOTE: Ethernet PHY must be removed from OMAP-L138 SOM-M1. Only then it can be used in this application.

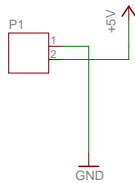
SD/MMC

Micro SD-Card Connector

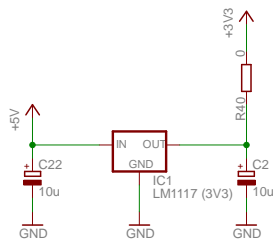


POWER

5V Input Connector



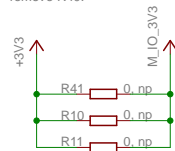
3,3V Supply Voltage Regulator



Same pin-out as National Semiconductor's industry standard LM317. (LM1117 Datasheet)

To power the board by SOMs on-board 3,3 V output voltage connect M_IO_3V3 and +3V3 net.

Note: If you choose to use the M_IO_3V3 of the SOM it is URGENTLY NECESSARY to also remove R40.

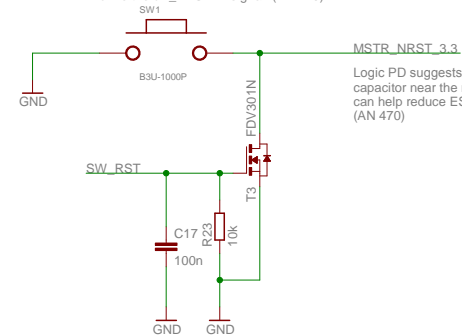


To power the board by USB connect USB0_VBUS and +5V net.

Note: If USB-power is chosen, do NOT connect external power supply!

Reset

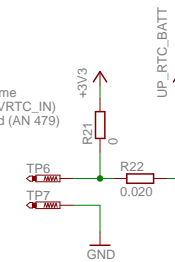
There is an internal pull-up resistor contained in the uP_RESETn signal; therefore, pull-up resistor or active drivers are not required to drive the uP_RESETn signal. (AN 470)



Logic PD suggests placing a 0.1µF capacitor near the reset pin; this can help reduce ESD-induced resets. (AN 470)

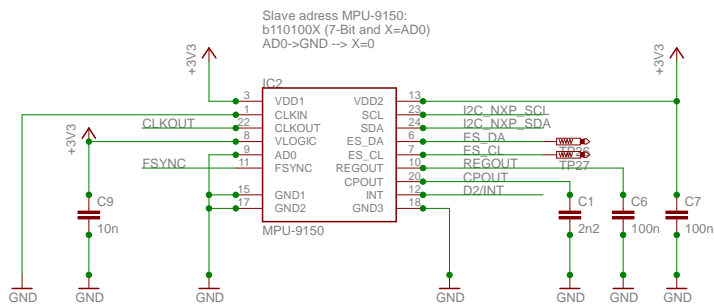
Real-Time Clock (RTC)

Ensure the real-time clock (RTC) rail (VRTC_IN) is always powered (AN 479)

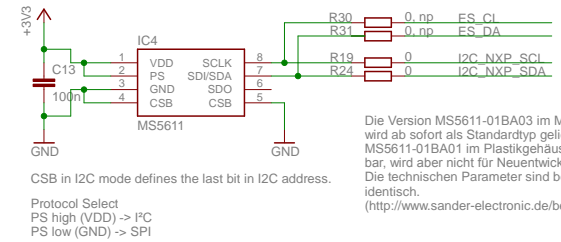


INERTIAL MEASUREMENT UNIT

Gyro,
Accelerometer,
Compass

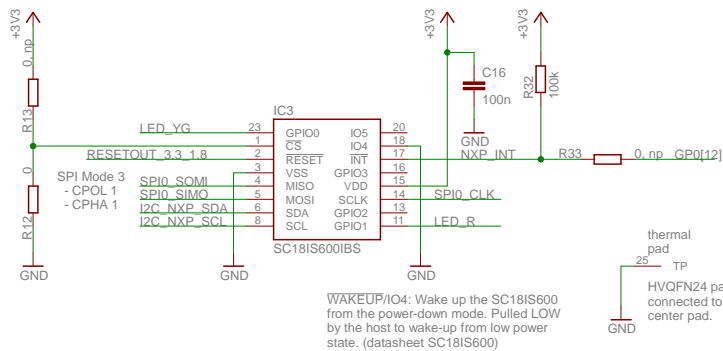


Pressure Sensor

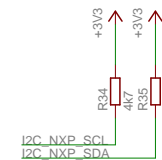


Die Version MS5611-01BA03 im Metallgehäuse wird ab sofort als Standardtyp geliefert. Der MS5611-01BA01 im Plastikgehäuse ist noch lieferbar, wird aber nicht für Neuentwicklungen empfohlen. Die technischen Parameter sind bei beiden Sensoren identisch.
(<http://www.sander-electronic.de/be00067.html>)

I²C-SPI Switch

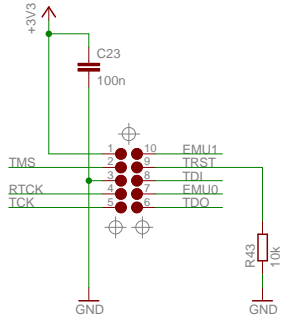


I²C Pull-Up Resistors



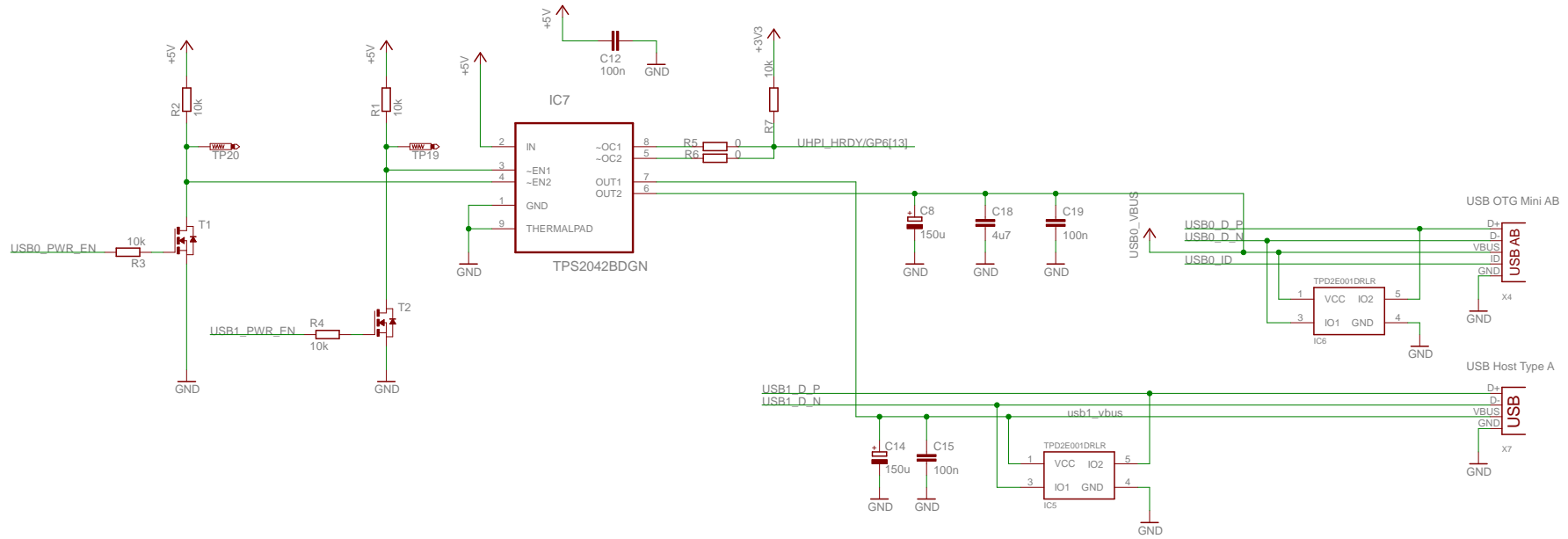
JTAG

Tag-Connect JTAG Contact Pads



JTAG Emulator XDS100v2:
Use TC2050-IDC-NL in combination with TC-C2000-M adaptor.

USB

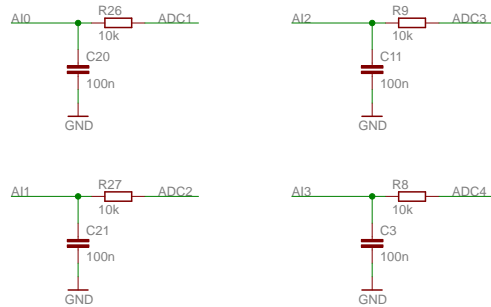


Verify that the USB differential pairs listed below have an impedance match of 90 ohms

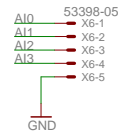
- uP_USB0_DP/uP_USB0_DP
- uP_USB1_DP/uP_USB1_DP

Connectors

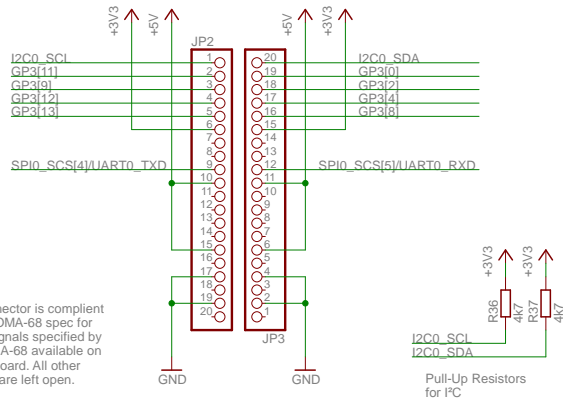
ADC-Inputs



Analog Inputs

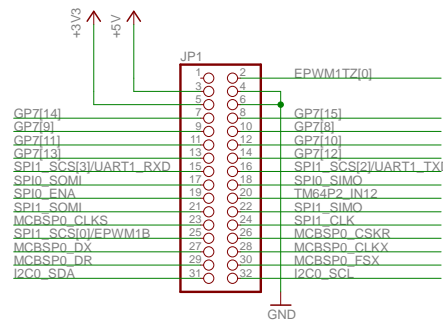


EOMA-68-Connector

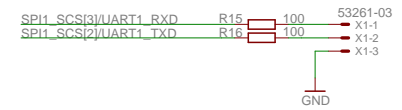


Connector is compliant to EOMA-68 spec for all signals specified by EOMA-68 available on the board. All other pins are left open.

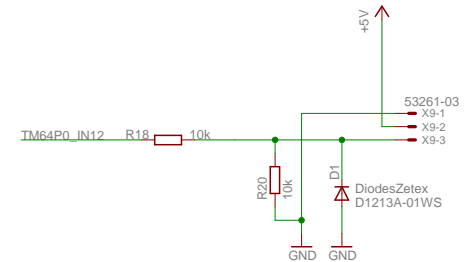
Breakout-Connector



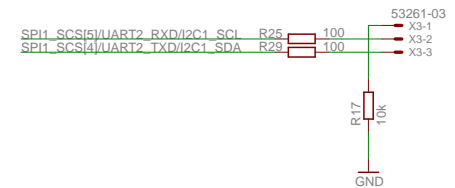
Debug Uart-Port



PPM Receiver

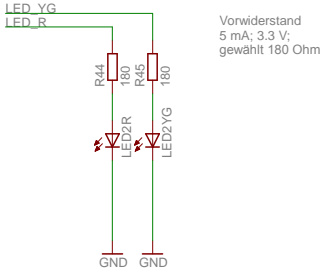


I2C Motor-driver

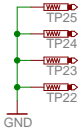
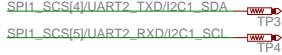
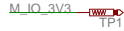
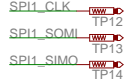
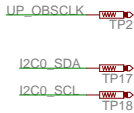
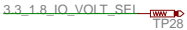
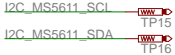
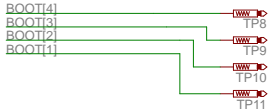


LEDs & Testpins

USER LED (Bi-Color)



Boot-Optionen



Layout

Layout

Flight Control for Quadcopter

Model Number & Rev	Author
FlightControl Rev A	Andreas Gschossmann

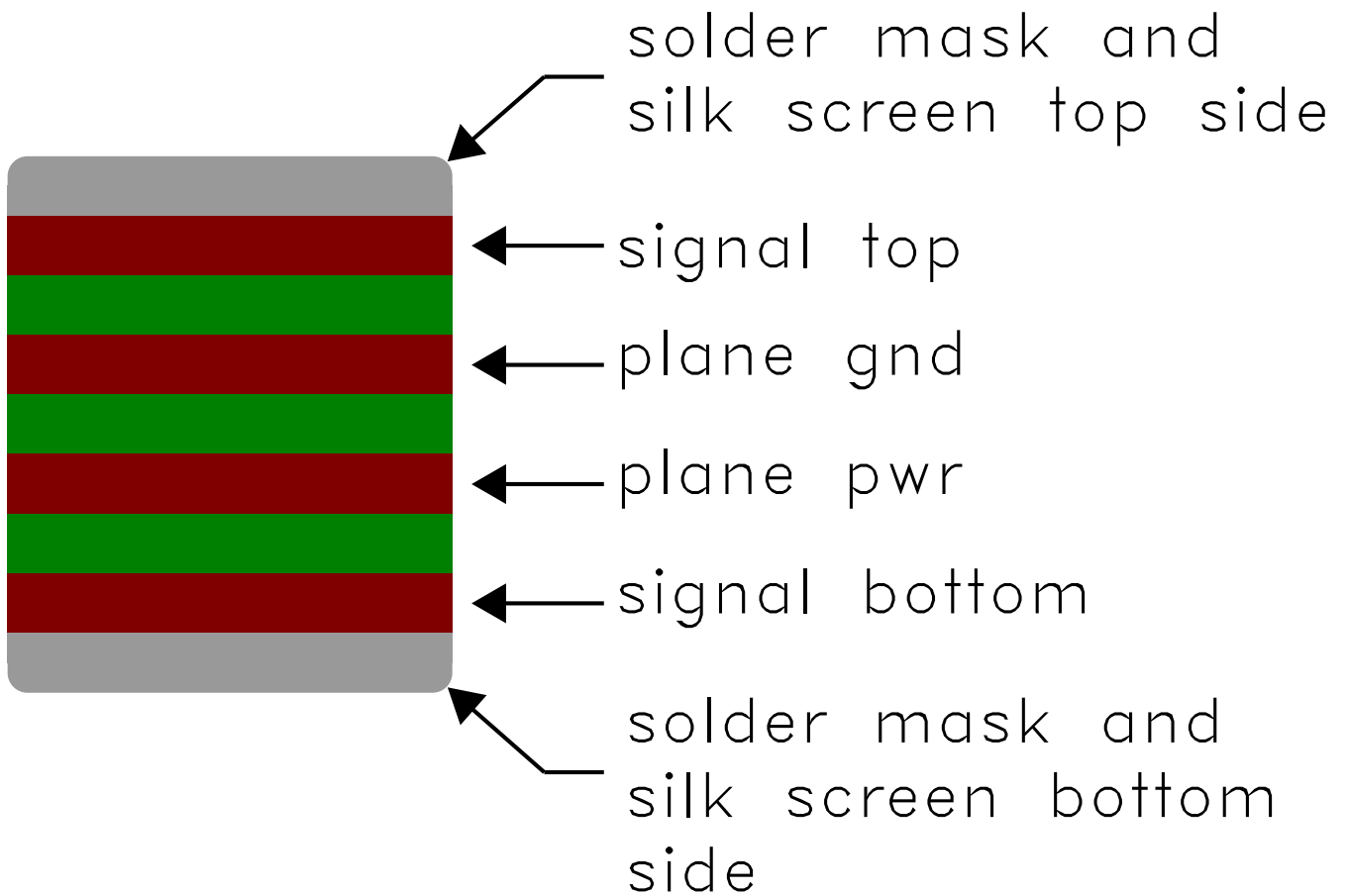
Contact

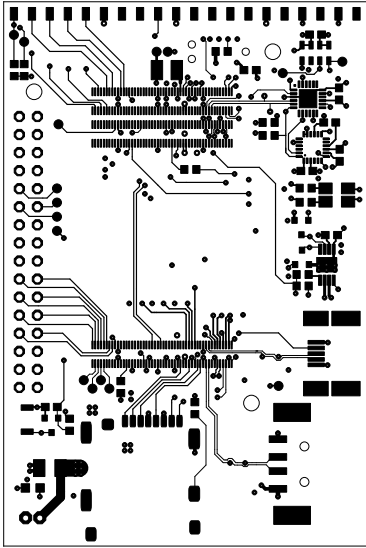
Andreas Gschossmann

Sensorik-Applikationszentrum (SappZ)

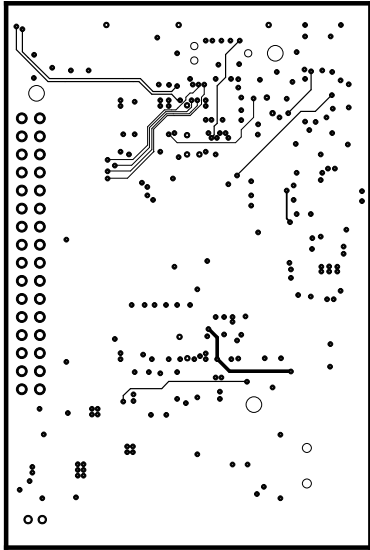
Telefon: +49 (941) 943 9848

Web: <http://www.sappz.de>

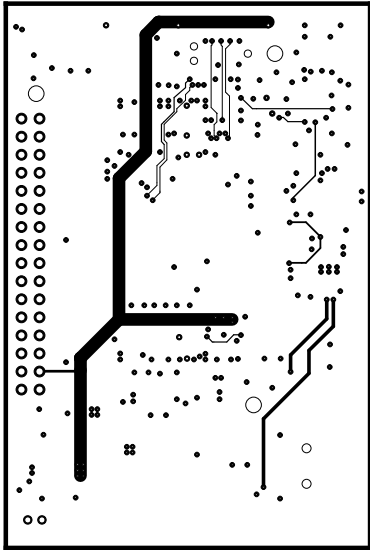




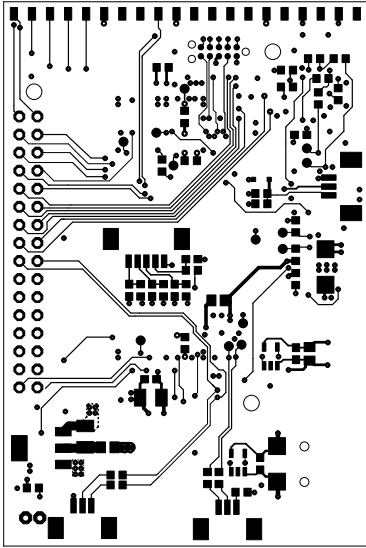
signal top



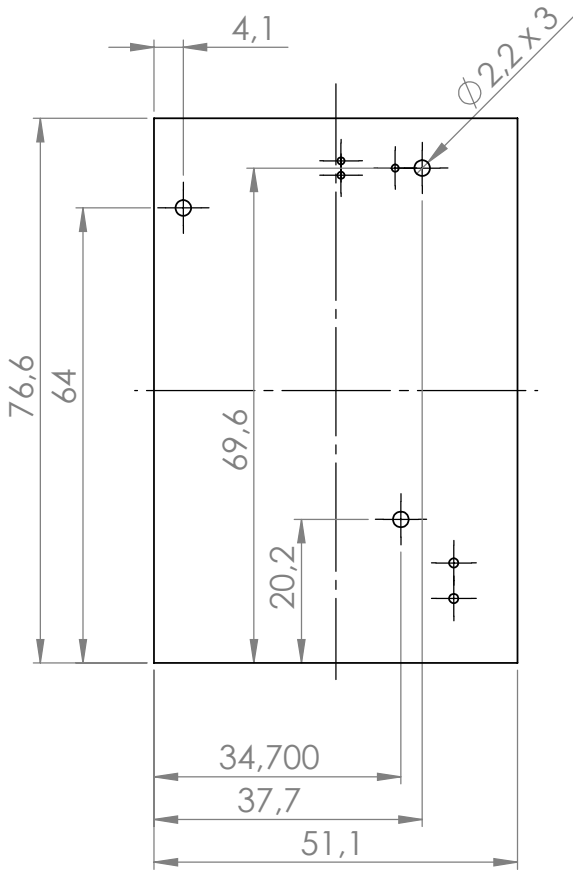
plane gnd



plane pwr



signal bottom



drill template

- [1] Am1808/omap-1138 linux user guide.
- [2] An1168 - high-speed usb pcb layout recommendations. <http://www.cypress.com/?docID=29107>. [Online; accessed 30-Juni-2015].
- [3] An470 - omap-1138 som-m1 design checklist. file:///home/usappz/Downloads/1017728D_AN470_OMAP-L138_SOM-M1_Design_Checklist.pdf. [Online; accessed 30-Juni-2015].
- [4] Bmp180 - digital, barometric pressure sensor. https://ae-bst.resource.bosch.com/media/downloads/pressure/bmp180/Flyer_BMP180_08_2013_web.pdf. [Online; accessed 30-Juni-2015].
- [5] Das u-boot – the universal boot loader. <http://www.denx.de/wiki/U-Boot/>. [Online; accessed 30-Juni-2015].
- [6] Data sheet - bmx055 - small, versatile 9-axis sensor module. <http://ae-bst.resource.bosch.com/media/products/dokumente/bmx055/BST-BMX055-DS000-02.pdf>. [Online; accessed 30-Juni-2015].
- [7] Datasheet:technical data - xtrinsic mpl3115a2 i2c precision altimeter. http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPL3115A2.pdf. [Online; accessed 30-Juni-2015].
- [8] Drone solutions. <http://www.microdrones.com/>. [Online; accessed 26-Juni-2015].
- [9] Eoma-68 specification. http://elinux.org/Embedded_Open_Modular_Architecture/EOMA-68. [Online; accessed 26-Juni-2015].
- [10] Embedded solutions. <http://www.logicpd.com/>. [Online; accessed 30-Juni-2015].
- [11] Entwickler und hersteller von mikro-uavs. <http://www.asctec.de/>. [Online; accessed 26-Juni-2015].
- [12] Footprint for tc2050-ipc plug-of-nails cable. <http://kurzurl.net/mzKTb>. [Online; accessed 30-Juni-2015].

- [13] Mpu9150 product specification - revision 4.3. http://www.inertiaelements.com/docs/PS-MPU-9150A-00v4_3.pdf. [Online; accessed 30-Juni-2015].
- [14] Ms5611-01ba01 variometer module, with lcp cap. http://www.amsys.de/sheets/amsys.en.ms5611_01ba01.pdf. [Online; accessed 30-Juni-2015].
- [15] Omap-1132/1138, tms320c6742/6/8 pin multiplexing utility. <http://www.ti.com/lit/an/sprab63b/sprab63b.pdf>. [Online; accessed 30-Juni-2015].
- [16] Sd simplified specification. <https://www.sdcard.org/downloads/pls/>. [Online; accessed 30-Juni-2015].
- [17] Sprs586i - omap-1138 c6000™ dsp+ arm® processor. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/omap-1138.pdf>. [Online; accessed 30-Juni-2015].
- [18] Sprufm2b - tms320c674x/omap-11x processor multimedia card (mmc)/secure digital (sd) card controller. <http://www.ti.com/lit/ug/sprufm2b/sprufm2b.pdf>. [Online; accessed 30-Juni-2015].
- [19] Scarabot. <http://davinci-copters.com/innovative-akkutechnik/>. [Online; accessed 26-Juni-2015].
- [20] Xds100v2. <http://tiexpressdsp.com/index.php/Xds100v2>. [Online; accessed 30-Dezember-2014].
- [21] Hyon Lim, Jaemann Park, Deawon Lee, and H.J. Kim. Build your own quadrotor: open-source projects on unmanned aerial vehicles. *Robotics and Automation Magazin*, 2012.
- [22] Micheal R. Molt, Dale E. Schinstock, and Robert M. Caplinger. Gps-aided ins solution with photogrammetry validation. *Aerotech Congress and Exhibition*, 2005.