

Projekt Automatisierungstechnik

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Betriebssysteme und Softwareversionen:	2
0 Lernziele Projekt Automatisierungstechnik (PAT)	2
1 Einleitung	4
2 Die Roboterhardware	5
2.1 RoboToGo	5
3 Die BeagleBone Grundlagen	5
3.1 Die BB-Hardware	6
3.2 Grove Cape für den BB	6
3.3 Programmierung des BeagleBone	6
3.3.1 Skriptprogramme	6
3.3.2 Kompilierte Programme	7
4 Das Robot Operating System (ROS)	8
4.1 Was ist ROS und wofür ist ROS gut?	8
4.2 Verwendung von ROS auf einem PC mit Ubuntu 18.04 LTS Betriebssystem	8
4.2.1 Installation von ROS auf den PC	8
4.2.2 Installation weiterer nützlicher Tools auf den PC	9
4.3 Verwendung von ROS auf dem BeagleBone mit Ubuntu 18.04 LTS Betriebssystem	9
4.3.1 Das Betriebssystemimage und die SD-Karte	10
4.3.2 Kopieren, Sichern, Wiederherstellen und Klonen von SD-Karten BB-Images	10
4.3.3 SD-Karte als Massenspeicher versus eMMC	11
4.3.4 Ermitteln der installierten Linuxdistribution	11
4.3.5 Installation des Tools show-pins für Übersichtsausgabe der Pinkonfiguration	11
4.3.6 Installation des Tools minicom für die UART (serielle) Kommunikation im Terminalfenster	12
4.3.7 Installation des Pythonpaketes pySerial für die UART (serielle) Kommunikation	12
5 Kommunikation zwischen PC und BeagleBone	13
5.1 Kommunikation via USB	14
5.2 Kommunikation via Ethernet über Switch im selben Netzwerk	15
5.2.1 Ermitteln der IP-Adresse des BB	15
5.2.2 Anschließen mehrerer BB via Ethernet und eigenen Hostnamen erstellen	15
5.3 Kommunikation via WLAN	16
5.3.1 Mit dem BB in ein vorhandenes WLAN einwählen	16
5.4 Bekannte Probleme	19
6 Umgang mit Linux	20
6.1 Dateimanagement auf dem BB, Übertragen von Dateien zwischen PC und BB	20
6.1.1 Dateiübertragung zwischen PC und BB im Terminalfenster	20
6.1.2 Dateiübertragung zwischen PC und BB grafikbasiert	21
7 Die Ein- und Ausgänge des BB	22
7.1 Verwendung des Tools config-pin	23
7.1.1 Anzeigen des aktuell geladenen Pinkonfiguration	23
7.1.2 Setzen von Pinfunktionen und -werten	23
7.2 Die Standard Pinkonfiguration für das PAT	24
7.3 Das SysFS	24
7.4 Die I ² C-Busse	26
7.5 Die SPI-Schnittstelle	27
7.6 Die UART-Schnittstelle	27
7.7 Hardwarespezifisches	27
8 Einbinden von Sensoren und Aktoren über Pythonskripte	27
8.1 Phytonbibliotheken	28
8.2 Beispielprogramm myBlink.py: LED blinken lassen	29
8.3 Beispielprogramm myGPIOread.py: GPIO auslesen	30
8.4 Beispielprogramm myADC.py: Analogspannung auslesen (ADC)	30
8.5 Beispielprogramm mySRF02_smbus.py: Sensordaten via I ² C von einem SRF02-Ultraschallsensor „zu Fuß“ auslesen	31
8.6 Beispielprogramm myPWM.py: PWM-Signal erzeugen	31
8.7 Beispielprogramm myMot.py: Ansteuerung von DC-Motoren über einen H-Bückentreiber	32
8.8 Beispielprogramm myUART.py: UART-Kommunikation (mit Arduino)	32
9 Einbinden von Sensoren und Aktoren über C/C++ Programme	34
10 Mit ROS-Knoten arbeiten und selbst ROS-Knoten erstellen	35
10.1 ROS und ROS-Knoten ausschließlich auf dem PC	35
10.2 ROS und ROS-Knoten ausschließlich auf dem BeagleBone	36
10.2.1 Beispiel ROS-Netzwerk in getrennten Terminalfenstern	37
10.2.2 Beispiel ROS-Netzwerk mit roslaunch in einem gemeinsamen Terminalfenster via Launchdatei	37

10.3 ROS-Knoten auf PC und BeagleBone, die miteinander kommunizieren.....	38
10.4 Simulink ROS-Knoten auf PC erzeugen, die mit ROS-Knoten auf BeagleBone kommunizieren.....	38
10.4.1 PC-Simulinkknoten als reiner ROS Publisher.....	39
10.4.2 PC-Simulinkknoten als Publisher-/Subscriber der mit einem Publisher des BB kommuniziert.....	40
11 Anhang.....	42
11.1 Pinkonfiguration Übersicht.....	42
11.2 Das Grove Cape Version 1 (schwarz).....	43
11.3 Das Grove Base Cape Version 2 (grün).....	44
11.4 Nano Text Editor Cheat Sheet.....	45
Quelle: [36].....	45
11.5 Linux Cheat Sheet.....	46
11.6 Glossar.....	47
11.7 Übersicht BB Hardware (Quelle [23]).....	48
11.8 Pinkonfiguration detailliert.....	49
11.9 Pinkonfiguration nach dem Booten des PAT-Image.....	51
11.10 Paketmanagement über apt.....	51
11.11 Verwendete Abkürzungen.....	52
11.12 Kommunikationsmöglichkeiten mit dem BB.....	53
11.13 Fachbücher zum BB.....	53
11.14 Tastenkombinationen für den Terminal-Multiplexer Terminator.....	54
11.15 Bash-Skript zum SSH-Verbindungsauflaufbau via USB / WLAN.....	54
11.16 Arduino-Firmware UARTComm_BB_Ardुino.ino zum Testen der UART-Verbindung.....	54
11.17 Bash-Skript zum Überprüfen und Wiederherstellen der WLAN-Verbindung.....	55
11.18 Stückliste RoboToGo.....	56
Quellenverzeichnis.....	57

Verwendete Betriebssysteme und Softwareversionen:

PC: Ubuntu 18.04 LTS mit ROS Melodic (Desktop Full) und MATLAB 2019b (MATLAB 9.7, Simulink 10.0, ROS Toolbox 1.0, Embedded Coder 7.3, Simulink Coder 9.2, MATLAB Coder 4.3, Control System Toolbox 10.7)

BeagleBone: ROS-Image (Ubuntu ohne grafische Benutzeroberfläche) von elinux.org [1] Version *bone-ubuntu-18.04.3-ros-iot-armhf-2019-10-21-6gb*. Flashen des eMMC mit Debian Stretch Flasher-Image *bone-eMMC-flasher-debian-9.12-iot-armhf-2020-03-01-4gb* damit SD-Kartenimage Bootpriorität hat.

0 Lernziele Projekt Automatisierungstechnik (PAT)

- Umgang mit komplexen eingebetteten Systemen am Beispiel eines BeagleBone (BB).
- Erlernen einfacher Grundlagen im Umgang mit Linux als Betriebssystem eines eingebetteten Systems, insbesondere das Einbinden der Schnittstellen zur I/O-Peripherie.
- Erlernen der Kommunikation zwischen einem Linux-basierten eingebetteten System und folgender Arten von Sensoren: Binäre Sensoren, analoge Sensoren, digitale Sensoren mit UART, I²C oder SPI Bus, digitale Sensoren mit Netzwerkschnittstelle.
- Nutzung einfacher Python-Skripte zusammen mit vorhandenen Bibliotheken zum Testen der Sensorfunktion, -kommunikation und der Sensordatenfusion.
- Erlernen verschiedener Konzepte der Sensorkommunikation sowie deren Vor- und Nachteile: Vergleich von Skripten wie Python mit nativen C-Programmen.
- Arbeiten mit der Middleware Robot Operating System (ROS): Dabei dessen Vorteile erfahren wie die Wiederverwendbarkeit von Code, die Peer-to-Peer-Kommunikation der als ROS-Knoten (Prozesse) abstrahierten Komponenten, die umfangreichen ROS-Entwicklungswerzeuge und Tutorials/Internetdokus.
- Erfahren, was Echtzeitdatenverarbeitung für ein mechatronisches System bedeutet, wodurch diese begrenzt wird und wie sie verifiziert wird.
- Erlernen von Strategien zur Fehlersuche in einem komplexen mechatronischen System.
- Praxis im technischen Dokumentieren von Projektergebnissen und Präsentation derselben in einem Vortrag.
- Erkennen der Vorteile des „Rapid Prototyping“ durch das Verwenden des BeagleBone zusammen mit ROS, MATLAB/Simulink und Python im Vergleich zur Entwicklung unter C mit einer konventionellen IDE wie Eclipse.
- Erkennen der Vor- und Nachteile der modellbasierten Entwicklung von Filter- und

Regelungsalgorithmen und deren automatischen Codeerzeugung mit Simulink. Erkennen des Praxisbezugs hiervon.

- Praxiserfahrung mit IP-Kommunikation zwischen Komponenten eines mechatronischen Systems, die teils auf unterschiedlicher Computerhardware basieren.
- Die Wirkung eines Kalman-Filters verstehen und diesen implementieren.
- Ein mechatronisches System bezüglich Hardware als auch Software *modularisieren* können.

Bekannte Bugs und mögliche Lösungswege dazu

Unterschiedliche Probleme mit der Koexistenz von Python 2.7 und Python 3 auf dem PC. Falls Python-Distribution Conda installiert ist, muss dies evtl. mit `conda deactivate` ggf. vor dem Verwenden von ROS deaktiviert werden.

Autostart des WLANs am BB funktioniert nicht obwohl unter `connmanctl` der Befehl `config wifi_xxx -autoconnect yes` unter `connmanctl` ausgeführt wurde. Workaround über Bash Skript `wifi_reset.sh`, das jede Minute via `Cron` ausgeführt wird.

Damit der BB von der SD-Karte bootet muss beim Einschalten der Stromversorgung die USR (USER)-Taste auf dem Grove-Cape gedrückt sein. Ansonsten bootet er vom eMMC, wenn sich dort noch die ab Werk alte Debianversion befindet. Nach Installation von z.B. von Debian Stretch 9.12 oder Debian Buster 10.2 als eMMC-Flasher auf dem eMMC bootet der BB standardmäßig von SD-Karte, wenn diese eingesteckt und bootfähig ist.

Die Python-Paketverwaltung pip3 wurde via `sudo apt-get python3-pip` nachinstalliert. Deshalb darf nun nicht mehr unter Python der Befehl `pip3 install --upgrade pip` eingegeben werden. Sonst kommt es zu Inkonsistenzen, zwischen der Ubuntu und Python-Paketverwaltung. Siehe wiki.ubuntuusers.de/pip/ oder github.com/pypa/pip/issues/5599. Python-Pakete sollten aus dem selben Grund unter `pip3` nur mit dem Befehl `pip3 install --user` installiert werden.

Mit dem C-Compiler gcc funktionieren die SMBUS Funktionen wie `i2c_i2c_smbus_read_byte()` nicht. Vermutlich ein Ubuntu-spezifisches Problem, dass die richtigen Headerfiles nicht gefunden werden.

Die für das PAT vorgesehene Grove-Stecker-Schnittstelle UART4 auf dem Grove Cape Version 2 funktioniert nicht mehr sobald TX z.B von einem angeschlossenen Arduino belastet wird. Die gleiche UART4-Verbindung über die Buchsenleiste funktioniert einwandfrei, wenn der Arduino vom BB via 5vSys mit Strom versorgt wird. Hingegen funktioniert die UART2 Grove-Stecker-Schnittstelle auf dem BB Board einwandfrei.

1 Einleitung

Sensoren werden meistens über **Mikrocontroller (μ C)** ausgelesen oder parametriert. Im Automobilbereich werden beispielsweise die Raddrehzahlsensoren vom μ C des ABS-Steuergeräts aus-gelesen, welches die Ventile der einzelnen Bremsen steuert. Im Bildungs- und Hobbybereich verwendet man oft die Arduino-Plattform mit einem ATmega328 μ C, der z.B. über den I²C-Bus mit Sensoren kommuniziert. Ein μ C wird überwiegend nur für eng begrenzte Aufgaben eingesetzt und besitzt eine limitierte Rechenleistung sowie einen limitierten Speicherplatz. Sein großer Vorteil ist neben den geringen Kosten sein zeitlich deterministisches Verhalten („Echtzeitverhalten“), weshalb er sich für zeit- und sicherheitskritische Anwendungen eignet.

Für komplexe Regelungsaufgaben wie z.B. das autonome Fahren reicht die Rechenleistung eines einfachen μ C bei weitem nicht mehr aus. Hier verwendet man komplexe eingebettete Systeme, die aus einem **Mikrocomputer** inkl. Betriebssystem (meistens Linux) bestehen. Solche Rechner nennt man „**Linux Embedded System (LES)**“.

Auch ein PC oder ein Laptop wird als Mikrocomputer bezeichnet. Der Rechner ist hier aber körperlich auf verschiedene Komponenten aufgeteilt, wie der Prozessor, der Grafikchip, der RAM-Speicher und etwa die Festplatte. Außerdem wird ein PC anders als ein μ C oder LES universell und nicht nur für *eine* eng eingegrenzte Anwendung verwendet.

Bei den LES befindet sich ein Großteil der Rechnerhardware auf einem hochintegrierten Chip. Daher spricht man hier auch von einem „System on a Chip (SoC)“.

Prominente Vertreter solcher LES sind der Raspberry Pi (RasPi), der Arduino Yun sowie der BeagleBone (BB)¹. Sie nennt man auch „Einplatinencomputer“.

Diese Systeme beinhalten wie PC einen leistungsstarken Prozessor mit mehreren Hundert MHz Taktfrequenz, einen etwa GByte großen Arbeitsspeicher und als Festplattenersatz einen ebenso großen Flashspeicher (z.B. eMMC). Wie bei einem PC-Mainboard gibt es auch Schnittstellen zur Peripherie (Tastatur, Bildschirm, ...) wie HDMI, USB, Ethernet oder WLAN.

Anders als μ C - die eigentlich „wahren“ SoCs² - sind LESs mit einem Betriebssystem ausgestattet. Dabei handelt es sich im Gegensatz zu PCs meistens um ein Linux-Betriebssystem ohne grafische Benutzeroberfläche.

Ein für das Sensor- und Regelungssystemprojekt (PAT) wesentlicher Vorteil von LES gegenüber einem PC sind dessen sogenannte I/O-Peripherie („Inputs / Outputs“). Diese Ein-/Ausgabepins sind beim RasPi und BB ähnlich wie beim Arduino auf Buchsenleisten hinausgeführt. Erst dadurch ist das Anschließen von Sensoren und Aktoren einfach möglich.

Eigentlich müsste man LES besser „*Linux auf einem eingebetteten System*“ nennen: Denn das eingebettete System profitiert von allen allgemeinen Linuxvorteilen, wie von dessen Effizienz, von der riesigen Anzahl hochwertiger Open Source Software, vom exzellenten Open Source Support, von den fehlenden Lizenzkosten und nicht zuletzt von der hohen Stabilität dieses Betriebssystems, das sowohl für Konsumprodukte wie Digitalkameras als auch auf großen Servern Verwendung findet.

Da Linux auf vielen verschiedenen SOC verwendet wird, können fertige Applikationen ohne größeren Aufwand auch auf andere Plattformen portiert werden, wenn z.B. die Leistungsfähigkeit des ursprünglichen SOC nicht mehr ausreicht.

Neben den Kosten ist der Hauptnachteil von LES die fehlende (harte) Echtzeitfähigkeit: μ C haben den Vorteil, dass deren I/O-Peripherie zeitlich deterministisch (in „Echtzeit“) bedient wird. Bei einem Mikrocomputer ist das aufgrund dessen Betriebssystems normalerweise nicht der Fall. Beispielsweise muss hier der Prozess zur Abfrage eines Sensorausgangs auf einen anderen vorher gestarteten Prozess warten.

Den BB zeichnet gegenüber dem RasPi aus, dass er zusätzlich zu seinem Prozessor zwei „Programmable Real-Time Units (PRU)“ sozusagen als 32 Bit Koprozessoren mit 200 MHz Taktrate besitzt, die für die I/O-Peripherie zuständig sind:

Die PRU des BB sind auf dem SOC Chip zusätzlich integrierte μ C, die unabhängig von der Prozessorauslastung die I/O-Peripherie bedienen. Damit ergibt sich auf der Ebene der I/O-Peripherie eine Echtzeitfähigkeit.

Im Vergleich zum RasPi hat der BB wesentlich mehr und besser dokumentierte Schnittstellen zur I/O-

- 1 Anfänglich wurde dieser Mikrocomputer als „BeagleBoard“ bezeichnet. Daher tauchen jetzt in der Literatur die Begriffe „BeagleBone“ und „BeagleBoard“ mehr oder weniger gleichbedeutend auf.
- 2 Bei μ C sind die Rechnerkomponenten in der Regel komplett in einem Chip integriert. Auf den LES ist z.B. der Flashspeicher meistens auf einem getrennten Chip aber auf der selben Platine untergebracht - daher auch die Bezeichnung „Einplatinencomputer“.

Peripherie für das Anbinden von Sensoren und Aktoren. Insgesamt ist der BB auch die professionellste Plattform unter den Maker-LES.

Trotzdem setzt sich auch in Mechatronikprojekten immer mehr der RasPi durch. Aufgrund dessen höheren Verbreitungsgrades bietet die Open Source Community hier deutlich mehr Software und Support als für den BB.

Ein wesentliches Lernziel des PAT ist das Erlernen des „Mechatronik Rapid Prototyping“ sowie das „Modularisieren“. Hierfür ist der BB mit seiner umfangreichen I/O-Peripherie und mit de PRU die ideale Hardwareplattform. Dazu muss aber auch eine „Rapid“ Softwareentwicklung hinzukommen, die für ein Modularisieren geeignet ist.

Im Praktikum wird die Middleware ROS verwendet, die das mechatronische System in getrennt programmierbare und testbare Komponenten (Module) - sogenannte ROS-Knoten - zerlegt. Es wird vorzugsweise die Programmiersprache Python statt C verwendet. Die Regelung sowie der Kalman-Filter wird über MATLAB/Simulink modellbasiert entwickelt. Dieses Simulinkmodell kommuniziert entweder zur Laufzeit als ROS-Knoten direkt mit den anderen Komponenten oder es wird daraus automatisch C-Code und damit ein ROS-Knoten erzeugt, welcher auf dem BB als Regelungskomponente unter ROS ausgeführt wird.

Reicht die Performanz der Python Skripte später nicht aus, so können die ROS-Quellcodes in C übertragen werden, was „zusätzliche Echtzeitfähigkeit“ ergibt.

Bis auf Codebestandteile, die die Schnittstellen des BB betreffen, lassen sich die erstellten Softwarekomponenten unverändert auf einen RasPi übertragen. Denn beide LES besitzen das gleiche Betriebssystem, den gleichen PythonInterpreter, einen funktionsgleichen C-Compiler sowie die gleiche ROS-Middleware. Für den RasPi sind dann aber zusätzliche Hardwaremodule z.B. für analoge Schnittstellen nötig.

2 Die Roboterhardware

2.1 RoboToGo

Als Roboterplattform wird das „RoboToGo“-Fahrzeug. Jedes der beiden Räder wird getrennt von einem Gleichstromantrieb inkl. Getriebe bewegt. Die Räder können bei Bedarf mit Drehencodern ausgestattet werden.

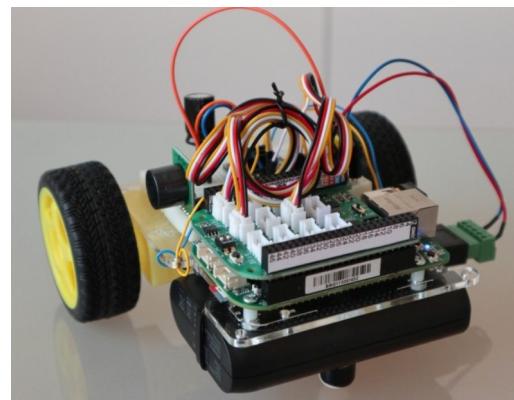
Der BB steuert mittels PWM-Signale über einen H-Brücken-Motortreiber die Motoren an. Die Energieversorgung geschieht über eine USB-Powerbank.

Die Kugelrolle (ball caster) unter der USB-Powerbank bildet den dritten Auflagepunkt.

Die Ansteuerung der Motortreiber (H-Brücke) ist sehr gut im Buch von D. Molloy [2], Kapitel 9 erklärt. Die Platine kann übrigens mit einem Shuntwiderstand bestückt werden, mit dem der aktuelle Motorstrom über einen ADC-Eingang des BB erfasst wird.

Mit dem RoboToGo wird das PAT für Studierende „mitnehmbar nach Zuhause“. Den ersetzt.

Achtung: Bei Lastspitzen durch den Motortreiber kann die Versorgungsspannung des BB so stark einbrechen, dass dieser einen Reset durchführt.



3 Die BeagleBone Grundlagen

Auf dem BB selbst und im Internet finden sich unzählige Informationen, wobei die erste Anlaufstelle immer die Internetseiten der BeagleBoard.org Foundation sein sollte [3]. Als Fachliteratur wird an erster Stelle auf [2], aber auch auf [4] und [5] verwiesen. Im Internet findet sich unter [6] vom Elektronikhersteller Adafruit umfangreiche Lernmaterialien und Python-Bibliotheken.

Die meisten Internetseiten und Bücher beziehen sich im Schwerpunkt auf die Programmierung des BB über JavaScript oder Python. Nur [2] bzw. [7] behandeln ausreichend die Programmiersprache C und das Einbinden von I/O-Peripherie.

Alle bis hierhin genannte Lehrbücher sind als Printbücher in der Hochschulbibliothek ausleihbar.

Im PAT wird der „BeagleBone Green (BBG)“ verwendet. Der BBG unterscheidet sich vom bekannteren „BeagleBone Black (BBB)“ nur darin, dass er aus Kostengründen keine HDMI-Schnittstelle aber dafür je einen „Grove“-Stecker für UART und I²C Peripherie hat, siehe [8].

Vom BBB und gibt es mehrere Varianten („Revisions“), welche sich z.B. in der Flashspeichergröße unterscheiden. Für das PAT sind die Revisions der BBB jedoch unerheblich.

Ein BBG kostet ca. 50 € bei Bezugsquellen wie z.B. [9] oder [10].

3.1 Die BB-Hardware

Das Herzstück des BB ist der Texas Instruments Sitara 1 GHz ARM-A8 Cortex Prozessor. Für ihn wird recht konsistent z.B. bei Dateibezeichnungen die Abkürzung „AM335x“ verwendet.

Der BBG besitzt u.a. folgende Datenschnittstellen:

65 binäre I/Os (GPIO), 8 DAC als PWM Ausgänge, 7 ADC, 2 I²C, 2 SPI, 2 UART, 2 CAN, Micro-SD-Karte, USB Host (USB-A), USB Client (Micro-USB), Ethernet (RJ45).

Als Benutzerinterface besitzt er nur 4 LEDs. Von Außen nach Innen („USR0“ bis „USR3“) sind dies Indikatoren für: „Herzschlag“ des Linuxkernels³, Zugriff SD-Karte, Prozessoraktivität, Zugriff eMMC-Speicher⁴. Weiter befindet sich noch ein Power- und einen Reset-Taster auf der Platine.

Im Anhang Kapitel 11.7 findet sich eine detaillierte Übersicht zur BB-Hardware.

3.2 Grove Cape für den BB

Ähnlich wie die sogenannten „Shields“ der Arduino-Plattform oder „Hats“ der Raspberry Pi Plattform gibt es für den BeagleBone „Capes“. Die Capes vereinfachen nicht nur das Anschließen der I/O-Peripherie sondern schützen auch den BB vor Schäden durch falsches Anschließen. Leider ist der BB gegenüber falsches Anschließen wesentlich empfindlicher als ein Arduino Uno:

Achtung:

Werden an den digitalen Schnittstellen Spannungen größer 3,3 V oder an der Analogschnittstelle größer 1,8 V angelegt, dann führt dies wahrscheinlich zur Zerstörung des BB.

Verwenden Sie daher als Eingänge ausschließlich die Grove-Stecker!

Im PAT wird das „Grove Cape“ des Herstellers Seeed [10] verwendet. Zusammen mit den speziell dafür konfektionierten „Grove“-Bauteilen von Seeed ist ein falsches Anschließen nahezu ausgeschlossen. Hiervon gib es die Version 1 (schwarz, siehe Abschnitt 11.2) und die Version 2 (grün, siehe Abschnitt 11.3). Verwenden Sie wenn möglich die neuere Version 2 (grün). Hierauf beziehen sich alle Infos der vorliegenden Anleitung.

Auf dem Grove Cape sind die UART-1/2-, I²C-2 -Kommunikation sowie für die ADC AIN 0 bis 4 auf spezielle Stecker herausgeführt. Diese Stecker haben zusätzlich noch einen GND und VCC-Anschluss und sind kompatibel mit der entsprechend vorkonfektionierten Grove-Peripherie. Es können über Adapterkabel aber beliebige Sensoren angeschlossen werden. Über den Jumperstecker neben der Ethernetschnittstelle kann (für das gesamte Cape!) die Versorgungsspannung VCC auf 3,3 V oder 5 V eingestellt werden.

Für die analogen Eingänge „Analog Input“ ist ein Verstärker nachgeschaltet, der die Eingangsspannung über einen Spannungsteiler von 5 V auf 1,8 V reduziert, damit selbst bei einer 5 V Eingangsspannung der ADC nicht zerstört wird. Das heißt aber auch, dass ein 3,3 V Signal auf den ADC diesen nicht voll aussteuert (ca. 2700 LSB statt FSR = 4096 LSB des eigentlichen ADC mit 12 Bit Auflösung).

Im Anhang im Abschnitt 11.2 und 11.3 finden sich ein Schaltplan und das Layout der beiden Grove Capes. Beachten Sie bitte, dass der BB viel mehr I/O-Möglichkeiten als Pins auf dem beiden Buchsenleisten hat.

3.3 Programmierung des BeagleBone

Das eingebettete System nennt man im Fachjargon auch „Target“, weil diese Hardware das Ziel des in einer Entwicklungsumgebung (IDE) erstellten Programmcodes ist, wenn man diesen am Ende überträgt bzw. kompiliert.

Auf unterster Ebene gibt zwei verschiedene Arten, wie ein Programm auf dem BB ablaufen kann:

3.3.1 Skriptprogramme:

Es gibt Skriptprogramme wie Python oder JavaScript (beim BB speziell das „BoneScript“), die nicht direkt auf dem Prozessor sondern auf einer virtuellen Maschine bzw. einem Interpreter ausgeführt werden. Dabei ist die virtuelle Maschine bzw. der Interpreter ein Programm, das direkt auf dem Prozessor läuft. Der Vorteil dieser beiden Skriptprogramme ist deren konsequente Objektorientiertheit und die einfache Portierbarkeit auf eine

3 Diese LED blinkt in einem Herzschlagrhythmus, und zeigt damit, dass das Linuxbetriebssystem störungsfrei läuft.
4 Im Image des PAT wird die USR3-LED dazu verwendet, nach dem Booten eine bestehende WLAN-Verbindung anzuzeigen.

andere Plattform wie z.B. auf einen RasPi.

BoneScript hat erstens den Vorteil, dass diese Programme direkt über einen Browser ausgeführt werden können, wie in [3] in mehreren Beispielen gezeigt wird. Zweitens ermöglicht diese Skriptsprache einen asynchronen Programmfluss, was im Kontext der Sensoranbindung bedeutet, dass der Programmablauf direkt von einem Sensorsignal beeinflusst werden kann.

Die Skriptsprachen haben aber den Nachteil, dass deren Ausführungsgeschwindigkeit sehr langsam ist. Für ein mechatronisches System wie z.B. die ABS-Regelung beim Auto wären die damit verbundenen Latenzzeiten inakzeptabel.

Im PAT wird trotzdem Python verwendet, da die Echtzeitanforderungen sehr gering sind. Auch für das Testen der Kommunikation mit der I/O-Peripherie ist Python sehr gut geeignet.

Eine kurze und gut verständliche Einführung in Python findet sich z.B. in [11].

Sehr praktisch ist bei Python die interaktive Python-Konsole als Schnittstelle zum Interpreter: Ähnlich wie bei MATLAB kann man in der Kommandozeile dieser „Python Shell“ einzelne Programmbefehle nacheinander eingeben und so testen, bevor man den Quellcode in eine Datei schreibt und dann als Ganzes ausführt. In der Python-Shell kann beispielsweise interaktiv die Kommunikation über eine I²C-Schnittstelle "ausprobiert" werden.

Auf dem BB wird der Python 3 Interpreter mit dem Befehl *python3* aufgerufen.

```
beagle@beaglebone:~$ python3
Python 3.6.8 (default, Oct  7 2019, 12:59:55)
[GCC 8.3.0] on linux
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.
>>> import Adafruit_BBIO.PWM as PWM
>>> PWM.start("P9_14", 12, 50, 0)
>>> PWM.set_duty_cycle("P9_14", 3)
```

Im Beispiel oben wird die Python Shell mit dem Befehl *python3* aufgerufen. Nach dem Import der PWM-Bibliothek wird ein PWM-Signal mit 12 % Duty Cycle und 50 Hz initialisiert, welches in der folgenden Zeile auf 3 % Duty Cycle reduziert wird. Die Python Shell verlässt man mit Strg + q. Hiermit wird z.B. ein Modellbauservo oder ein DC-Motor angesteuert.

Achtung: Es gibt leider zwei verschiedene Pythonversionen 2.7 und 3.x, die sozusagen in zwei Paralleluniversen existieren.

ROS Melodic verwendet aus Kompatibilitätsgründen noch Python 2.7. D.h. die Python-Skripte der ROS-Knoten basieren noch auf dieser Python-Version. Die Unterschiede zu Python 3 in der Syntax sind für das PAT jedoch vernachlässigbar.

Auf dem PC als auch direkt auf dem BB wird ausschließlich Python 3 verwendet.

3.3.2 Kompilierte Programme

ROS ermöglicht auch die Knoten in C zu coden und Simulink erzeugt ohnehin C-Code.

Die Latenzzeiten werden wesentlich kleiner, wenn der Programmcode in der Programmiersprache C erstellt wird. Denn dabei wird eine speziell für den Prozessor ausführbare sogenannte „native“ Programmdatei „kompiliert“ = erzeugt. Über die C-Programmierung kann auch die PRU direkt angesteuert werden, was die Ausführungsgeschwindigkeit nochmals erhöht. Hier sind aber sehr weitgehende Programmierkenntnisse erforderlich.

Ganz so „Schwarz-Weiß“ ist die Abgrenzung der Skriptprogramme zu den C-Programmen jedoch nicht: In der Realität werden Skriptprogramme immer mit Bibliotheken kombiniert, die kompilierten Programmcode enthalten. D.h. der Interpreter ruft Unterprogramme auf, die als nativer Code vorliegen und wahrscheinlich in C programmiert wurden. Nachteilig ist hierbei jedoch, dass dieser C-Code praktisch nicht debugged werden kann, wenn Laufzeitfehler auftreten.

Python-Skripte lassen sich daher nur sehr mühsam debuggen.

4 Das Robot Operating System (ROS)

4.1 Was ist ROS und wofür ist ROS gut?

Ganz einfach gesagt: ROS ist eine sogenannte „Middleware“, die zwischen ausführbaren Programmen und dem Betriebssystem arbeitet. ROS wird dafür verwendet, um ein mechatronisches System auch in Bezug auf Software in seine einzelnen Komponenten zu **modularisieren**.

Konkret ist in ROS jede Komponente wie z.B. ein Sensor, ein Aktor oder eine Regelung einem Prozess (genannt Knoten in Form eines C- oder Python-Quellcodes) zugeordnet. Bekanntlich ist bei einem mechatronischen System das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten das A und O: Genau hier setzt ROS an, in dem es die Kommunikation der einzelnen Knoten organisiert.

Eine sehr gute Erklärung zum Sinn und Zweck von ROS findet sich in [12]. Auch in der Wiki der offiziellen ROS Internetseiten [13] finden sich exzellente Grundlageninformationen.

Im PAT wird die ROS-Version „Melodic“ verwendet. Genau genommen handelt es sich hierbei um eine Version von "ROS1". Denn die komplett überarbeitete Version „ROS2“ befindet sich derzeit schon im Teststadium. Ähnlich wie Python 2 vor einigen Jahren ist derzeit ROS1 noch weitaus mehr verbreitet und läuft wesentlich stabiler als das neue ROS2. Es ist aber damit zu rechnen, dass Mitte der 20er Jahre die ROS-Community auf ROS2 umsteigen wird.

4.2 Verwendung von ROS auf einem PC mit Ubuntu 18.04 LTS Betriebssystem

Dieses Kapitel ist nur relevant, wenn Sie im PAT mit Ihrem eigenen PC arbeiten möchten. Die PCs im Sensorlabor sind komplett fertig konfektioniert für die Arbeit mit ROS, Simulink und BeagleBone. Hier müssen Sie keinerlei weiteren Installationen oder größere Einstellungen vornehmen.

Als Betriebssystem für eine ROS-Installation wird Ubuntu 18.04 LTS empfohlen, Hierfür existieren bewährte Paketquellen für ROS, die die Installation sehr einfach machen.

4.2.1 Installation von ROS auf den PC

Die nachfolgend beschriebenen Installationsschritte von ROS sind quasi identisch zu der Anleitung auf den offiziellen ROS Internetseiten [14].

- Bei der Ubuntu-Paketverwaltung die ROS-Pakete hinzufügen:

```
sudo sh -c 'echo "deb http://packages.ros.org/ros/ubuntu $(lsb_release -sc) main" > /etc/apt/sources.list.d/ros-latest.list'
```

- Schlüssel hinzufügen:

```
sudo apt-key adv --keyserver 'hkp://keyserver.ubuntu.com:80' --recv-key C1CF6E31E6BADE8868B172B4F42ED6FBAB17C654
```

- Ubuntu-Paketverwaltung aktualisieren (zumal ja ROS als neue Quelle hinzugefügt wurde):

```
sudo apt-get update
```

- ROS melodic Desktop Full mit apt-get installieren (dauert etwa vier bis zehn Minuten):

```
sudo apt-get install ros-melodic-desktop-full
```

- ROS-Umgebungsvariablen in `.bashrc` einfügen, damit diese beim Öffnen eines Terminalfensters (=Bash Shell) automatisch geladen werden. Anschließend dies im schon offenen Terminal mit `source` manuell machen:

```
echo "source /opt/ros/melodic/setup.bash" >> ~/.bashrc  
source ~/.bashrc
```

- Weitere ROS-Tools und -Packages hinzufügen:

```
sudo apt install python-rosdep python-rosinstall python-rosinstall-generator  
python-wstool build-essential
```

- Hilfsprogramm `rosdep` initialisieren:

```
sudo rosdep init  
rosdep update
```

- Kontrolle, ob Umgebungsvariablen richtig gesetzt sind:

```
printenv | grep ROS
```

Dieser Befehl sollte folgenden Output liefern:

```
ROS_ETC_DIR=/opt/ros/melodic/etc/ros  
ROS_ROOT=/opt/ros/melodic/share/ros  
ROS_MASTER_URI=http://localhost:11311
```

```
ROS_VERSION=1
ROS_PYTHON_VERSION=2
ROS_PACKAGE_PATH=/opt/ros/melodic/share
ROSLISP_PACKAGE_DIRECTORIES=
ROS_DISTRO=melodic
```

9. ROS Setup mit dem Befehl `source /opt/ros/melodic/setup.bash` nochmals im aktuellen Terminalfenster ausführen. Später wird dieser Befehl da in `.bashrc` integriert bei jedem Öffnen eines neuen Terminalfensters automatisch mit ausgeführt. Nur wenn damit die Umgebungsvariablen richtig gesetzt sind, funktionieren die verschiedenen ROS-Kommandos einwandfrei.

10. Da im PAT abweichend zum Defaultzustand von ROS Melodic Python 3 verwendet wird, muss mit der Ubuntu-Paketverwaltung die Python 3 Paketverwaltung `pip3` und anschließend mit `pip3` das Pythonpaket `catkin_pkg` nachinstalliert werden:

```
sudo apt install python3-pip
pip3 install --user catkin_pkg
```

Prinzipiell ist es besser Pythonpakte mit `apt-get` unter Ubuntu zu installieren. Das Paket `catkin_pkg` gibt es jedoch nicht in den Ubuntu-Paketquellen. `pip3` sollte um Konflikte mit `apt-get` zu vermeiden sicherheitshalber mit dem Flag `--user` ausgeführt werden. Dann wird das Paket sicher unter `~/.local/lib/python3.6/site-packages/` installiert - auch wenn Ubuntu nicht selbst dafür sorgt. Siehe hierzu [15]. Die von Ubuntu verwalteten Pakete befinden sich unter `/usr/lib/python3.6`, die mit `setup-tools` manuell installierten Pakete in `/usr/local/lib/python3.6/dist-packages`.

11. Einen Workspace erstellen und Python 3 als Default-Pythonversion für ROS festlegen: Sämtliche Quellcodes und andere Dateien, die während des PAT erstellt werden, sollten im sogenannten "Catkin Workspace" abgelegt werden. Dafür wird ein entsprechendes Verzeichnis `catkin_ws` erstellt und initialisiert. Über das anschließende `catkin_make` Befehl wird Python 3 als Default-Pythonversion gesetzt.

```
mkdir -p ~/catkin_ws/src
cd ~/catkin_ws/
catkin_make -DPYTHON_EXECUTABLE=/usr/bin/python3
```

Bei dem letzten Befehl ist es wichtig, dass er in einem bis auf `src` leeren neu erstellten Verzeichnis `catkin_ws` initial ausgeführt wird.

12. Der eben erstellte Workspace muss nun noch den Umgebungsvariablen hinzugefügt werden:
`source devel/setup.bash`

13. Zur abschließenden Kontrolle werden die Umgebungsvariablen ausgegeben mit dem Befehl:

```
echo $ROS_PACKAGE_PATH
```

Dieser Befehl sollte folgenden Output liefern, wobei `xxx` der verwendete Benutzername ist:
`/home/xxx/catkin_ws/src:/opt/ros/melodic/share`

Damit ist die komplette ROS-Entwicklungsumgebung auf dem PC installiert bzw. konfiguriert und die ROS-Tutorials beginnend mit [16] können nun durchgearbeitet werden.

4.2.2 Installation weiterer nützlicher Tools auf den PC

Bei ROS spielt die Kommunikation zwischen Rechnern eine wichtige Rolle. Mit dem Tool `Net Tools`, (auf dem BB schon vorhanden) können mit Befehlen wie `ifconfig` die unterschiedlichen PC-Schnittstellen untersucht werden. Installation auf dem PC mit

```
sudo apt-get install net-tools
```

Da im PAT mit ROS jedes Modul des mechatronischen Systems über einen getrennten Prozess abgebildet wird, benötigt man auf dem PC oft vier oder mehr Terminalfenster. Dafür ist das Programm „Terminator“ optimal: Ein Terminal-Multiplexer, der das Verwenden mehrere Konsolen (Terminals) in einem einzigen Fenster ermöglicht, siehe [17]. Die Installation erfolgt mit

```
sudo apt-get install terminator
```

Anschließend kann `terminator` mit der Tastenkombination `strg + alt + t` gestartet werden.

4.3 Verwendung von ROS auf dem BeagleBone mit Ubuntu 18.04 LTS Betriebssystem

Für die BB im PAT wird wie auf dem PC ein Ubuntu-Betriebssystem verwendet. Das Ubuntu auf dem BB ist aber sehr abgespeckt und besitzt keine Benutzeroberfläche.

Es wird ein fertiges Image inkl. ROS-Installation verwendet, welches als aktuelle Version unter elinux.org [1]

heruntergeladen werden kann.

Das PAT verwendet ein solches Image mit ergänzenden Codebeispielen, welches auf der Version *bone-ubuntu-18.04.3-ros-iot-armhf-2019-10-21-6gb* basiert.

4.3.1 Das Betriebssystemimage und die SD-Karte

Im PAT wird ausschließlich die SD-Karte als Speichermedium im BB verwendet. Ähnlich wie auf der Festplatte eines PC befindet sich darauf das Betriebssystem, alle installierten Treiber und Programme sowie persönliche Dateien.

Anders als bei einem PC wird das Betriebssystem auf dem BB nicht installiert, sondern es wird ein sogenanntes „Image“ des Betriebssystems auf die SD-Karte des BB bitweise kopiert. Als Image bezeichnet man ein Abbild (1:1 Kopie) von einer oder mehreren Partitionen eines Speichermediums, welches üblicherweise anschließend noch komprimiert wird. Im Gegensatz zu PCs, die unterschiedliche Prozessoren, Grafikchips usw. haben, ist ein solches Klonen der „Festplatte“ bei einem festen BB-Modell (hier BBG) möglich. Denn hier ist die Hardware immer identisch. Umgekehrt kann man den Ist-Zustand eines BB als Image (inkl. der zwischenzeitlich zugefügten Programme und Dateien) konservieren und so eine komplette Back Up Datei erstellen.

Mit dem Begriff „Image“ ist also eine 1:1 Kopie des Speichermediums des BB gemeint. Das aktuelle BB-Image für das PAT finden Sie als Download-Link unter Relax.

4.3.2 Kopieren, Sichern, Wiederherstellen und Klonen von SD-Karten BB-Images

Back Up eines SD-Karten Images auf einen (Linux-) PC:

Zuerst wird ohne SD-Karte im PC mit dem Befehl `lsblk` eine Liste der angeschlossenen Blockgeräte ausgegeben. Diesen Befehl wiederholt man anschließend mit eingesteckter SD-Karte. Im Vergleich beider Ausgaben und auch in Bezug auf die Speicherkartengröße lässt sich damit der Pfad der SD-Karte bestimmen, in diesem Beispiel `dev/mmcblk0`.

Ohne SD-Karte:

```
mackst@tec-04-206-02:~$ lsblk
NAME      MAJ:MIN RM    SIZE RO TYPE MOUNTPOINT
...
sdb        8:16    0 232,9G  0 disk
└─sdb1     8:17    0   500M  0 part
└─sdb2     8:18    0 231,5G  0 part
└─sdb3     8:19    0   907M  0 part
```

Mit SD-Karte:

```
mackst@tec-04-206-02:~$ lsblk
NAME      MAJ:MIN RM    SIZE RO TYPE MOUNTPOINT
sdb        8:16    0 232,9G  0 disk
└─sdb1     8:17    0   500M  0 part
└─sdb2     8:18    0 231,5G  0 part
└─sdb3     8:19    0   907M  0 part
mmcblk0   179:0   0   14,9G  0 disk
└─mmcblk0p1 179:1   0    5,3G  0 part /media/mackst/rootfs
```

Der Befehl `sudo dd if=/dev/mmcblk0 of=~/SDCardBackup.img status=progress` überträgt die komplette SD-Karte als Imagedatei `SDCardBackup.img` auf den PC in das Home-Verzeichnis und zeigt während dieser recht langen Zeit den Kopierstatus an.

```
mackst@tec-04-206-02:~$ sudo dd if=/dev/mmcblk0 of=~/SDCardBackup.img status=progress
31116288+0 Datensätze ein
31116288+0 Datensätze aus
15931539456 Bytes (16 GB, 15 GiB) kopiert, 784,569 s, 20,3 MB/s
```

Kopieren eines vorhandenen Images auf eine SD-Karte (unter Linux):

Zuerst wird zur Sicherheit wieder mit dem Befehl `lsblk` der Pfad der SD-Karte ermittelt in diesem Beispiel `dev/mmcblk0`.

Nun kann man im Terminalfenster mit dem Befehl `sudo dd if=~/SDCardBackup.img of=/dev/mmcblk0 status=progress` mit rudimentärer Fortschrittsanzeige die Imagedatei `SDBackup.img` auf die SD-Karte kopieren.

Einfacher und mit grafischer Fortschrittsanzeige funktioniert es mit dem Ubuntu Datei-Explorer: Hier wählt man mit der rechten Maustaste auf der Imagedatei die Option „Mit anderer Anwendung öffnen“, dann „Schreiber von Laufwerkabbildern“ und wählt in dem erscheinenden Fenster als Ziel die SD-Karte, also das Blockgerät

`dev/mmcblk0` aus.

4.3.3 SD-Karte als Massenspeicher versus eMMC

Das PAT verwendet das Linuxbetriebssystem als „Image“ auf einer SD-Karte.

Der eMMC-Speicher wird nicht benötigt, da von der SD-Karte aus gebootet und dort auch die Software abgespeichert wird.

Der BB besitzt sozusagen als SSD-Festplatte einen eMMC (Embedded Multi Media Card). Dieser Speicher ist recht schnell und hat eine Kapazität von 4 GB.

Wenn man auf diesem Speicher jedoch das Betriebssystem „zerschossen“ hat, dann ist es schwieriger auf dem eMMC befindliche Dateien nachträglich zu sichern. Stehen schnelle SD-Karten zur Verfügung, so ist es vorteilhaft diese statt des eMMC als Festplatte zu verwenden. In diesem Fall befinden sich alle Dateien inkl. Dateisystem auf der SD-Karte statt auf dem eMMC. Dieses sogenannte „Betriebssystem-Image“ lässt sich dann einfach auf dem PC mit einem SD-Kartenleser sichern oder auf eine andere SD-Karte klonen.

Wenn man das Betriebssystem auf der SD-Karte zerschossen hat, dann kann man dort befindliche eigene Dateien anders als beim eMMC dadurch retten, indem man die SD-Karte vom BB entfernt und mit einem PC ausliest.

Wenn keine SD-Karte mit funktionierendem Linux-Image eingesteckt ist, dann bootet der BB vom eMMC aus. Andernfalls bootet er (je nach Image auf dem eMMC) manchmal auch vom eMMC aus, falls beim Booten nicht die USER (USR)-Taste gedrückt ist.

Achtung:

Bootet der BB standardmäßig beim Einschalten der Stromversorgung, also z.B. beim Einsticken des USB-Kabels, vom eMMC aus, so muss beim Einschalten die USER (USR)-Taste auf dem Grove-Cape gedrückt sein, damit der BB von der SD-Karte aus bootet.

Tipp:

Wichtig ist, dass man nach dem Booten weiß, ob man nun auf der SD-Karte oder auf dem eMMC arbeitet. Am einfachsten ist es, wenn man einen individuellen Hostnamen verwendet: Dieser erscheint nämlich nur im Promt, wenn von SD-Karte aus gebootet wurde. Ansonsten erscheint der Standard-Hostname *beaglebone*.

Alternativ kann man auch über das Flackern der USR LEDs während des Bootens herausfinden:

USR3 (erste LED neben der Ethernetbuchse): Booten von eMMC.

USR1 (die übernächste LED neben der „Herzschlag LED“): Booten von der SD-Karte.

Nach dem Booten zeigt die USR3-LED jedoch eine aktive WLAN-Verbindung (falls vorhanden) an.

4.3.4 Ermitteln der installierten Linuxdistribution

Der BB ist mit einem Ubuntu 18.04 LTS Betriebssystem ausgestattet. Ubuntu ist eine Linuxdistribution. Welche Distribution sich genau auf dem BB befindet, ermittelt der Befehl

```
cat /etc/debian_version (Output buster/sid)
```

oder `cat /etc/dogtag` (Output BeagleBoard.org ROS Image 2019-10-21).

oder `lsb_release -a` mit Output

No LSB modules are available.

Distributor ID: Ubuntu

Description: Ubuntu 18.04.3 LTS

Release: 18.04

Codename: bionic

Debianversion und Kernelversion sind etwas Verschiedenes. Die Kernelversion wird mit dem Befehl `uname -a` angezeigt. Im Praktikum wird die Kernelversion 4.19.73 verwendet. Hier bezeichnet die erste Zahl die eigentliche „Kernelversion“, welche sich nur alle paar Jahre ändert. Die beiden folgenden Zahlen beziehen sich auf die „Major Revision“ und „Minor Revision“ des Kernels.

4.3.5 Installation des Tools show-pins für Übersichtsausgabe der Pinkonfiguration

Das Programm `show-pins` [18] verwendet das Tool `config-pin` um nacheinander die Konfiguration aller Pins des BB auszulesen und in einer Tabelle im Terminalfenster darzustellen.

Die Installation erfolgt mit folgenden Befehlen:

```
cd /usr/local/sbin  
sudo wget -N https://raw.githubusercontent.com/mvduin/bbb-pin-utils/master/show-pins
```

```
sudo chmod a+x show-pins
```

Die Verwendung über folgende Befehle:

```
sudo show-pins | sort    # sorted by expansion header pin  
sudo show-pins          # sorted by pin index  
sudo show-pins -v # show more pins  
sudo show-pins -vv      # show all configurable pins
```

Ausgabe bei letzterem Befehl siehe Abschnitt 11.9.

4.3.6 Installation des Tools minicom für die UART (serielle) Kommunikation im Terminalfenster

Aus einem Terminalfenster lässt sich die UART-Verbindung mit dem Tool *minicom* unkompliziert testen. Es wird installiert via *sudo apt-get install minicom*.

4.3.7 Installation des Pythonpakets pySerial für die UART (serielle) Kommunikation

Pythonpakete sollten soweit in den Ubuntu-Paketquellen vorhanden mit *apt-get* installiert werden, um Konflikte mit der Python eigenen Paketverwaltung *pip* (bzw. *pip3* bei Python 3) zu vermeiden [15]. Das Paket *pySerial* für Python 3 ist in den Ubuntu-Paketquellen vorhanden. Somit wird es mit folgendem Befehl installiert:

```
sudo apt-get install python3-serial
```

5 Kommunikation zwischen PC und BeagleBone

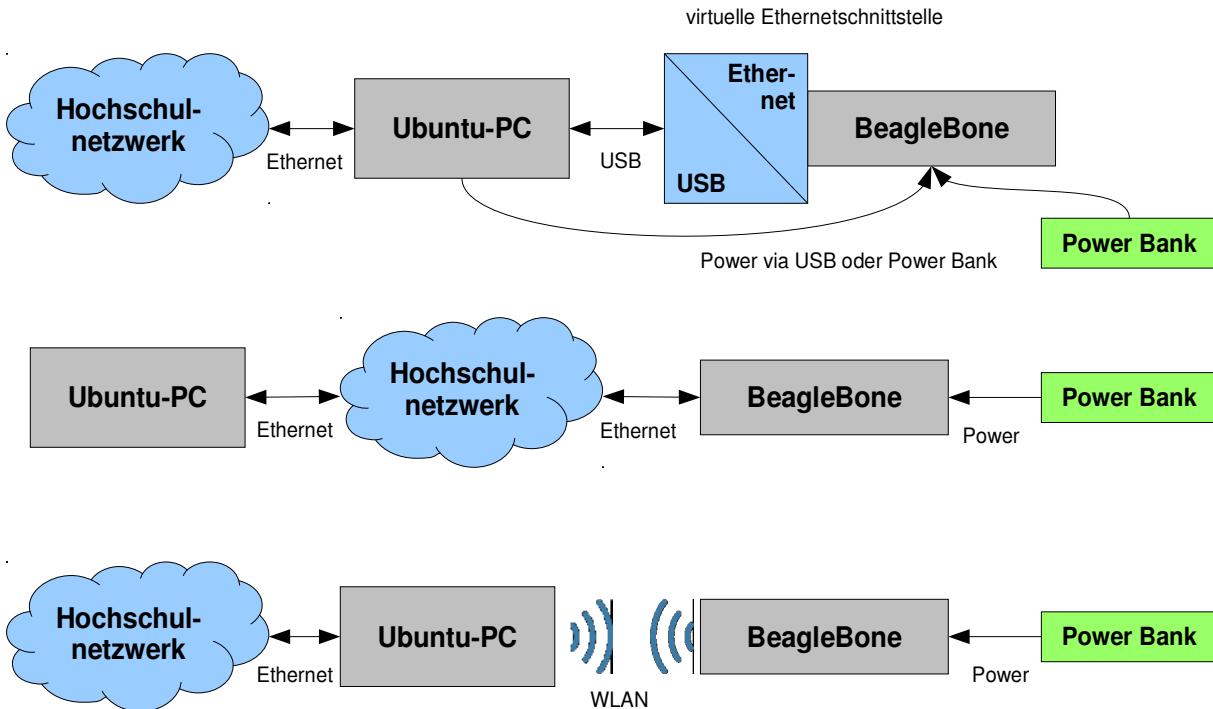


Abbildung 1: Übersicht der im Praktikum verwendeten Kommunikationsarten und Stromversorgungen.

Nachfolgend wird gezeigt wie über ein Terminalfenster auf dem PC eine Verbindung mit dem BB aufgebaut wird. Damit wird der BB durch den PC über Textkommandos in der sogenannten „Kommandozeile“⁵ (Shell oder Bash genannt) sozusagen ferngesteuert: Der PC ersetzt hierfür die Tastatur und den Bildschirm, der sonst am BB angeschlossen sein müsste. Denn auf dem im PAT verwendeten Image des BB gibt es keine Benutzeroberfläche.

Zuerst muss eine Kommunikation zwischen dem BB und dem PC physikalisch aufgebaut werden. Dafür gibt es unterschiedliche Wege (siehe Abb. 1).

Grundsätzlich kann der BB über vier verschiedene Schnittstellen mit dem PC verbunden werden:

1. Serielle Schnittstelle (wird im PAT nicht verwendet)
2. USB-Schnittstelle (emuliert eine Ethernetschnittstelle)
3. Ethernetschnittstelle (entweder im selben Netzwerk wie der PC oder lokal über ein „Cross Over“-Kabel)
4. WLAN-Schnittstelle

Die PC-Kommunikation via serieller Schnittstelle wird im PAT nicht verwendet. (Die serielle UART-Schnittstelle wird im PAT nur intern am BB für die I/O-Kommunikation mit Sensoren bzw. Aktoren verwendet.) Sie ist die einzige Möglichkeit den Bootvorgang des BB zu kontrollieren, da die übrigen Schnittstellen dann noch inaktiv sind.

Bei der ersten Inbetriebnahme verbindet man den BB am besten via USB mit dem PC. Damit ist auch gleichzeitig die Spannungsversorgung gewährleistet, und kein separates Netzteil oder eine Power Bank wird benötigt. Bei erstmaligen Anschließen eines BB an einen PC wird der BB zuerst nur als Massenspeicher ähnlich einem USB-Stick erkannt.

Parallel zu USB kann der BB sich auch via Ethernetschnittstelle z.B. in das Hochschulnetzwerk einbuchen. Dann kann die USB-Verbindung auf die Stromversorgung reduziert und durch eine Power Bank an der 5 V Buchse bzw. VDD_5V ersetzt werden.

Hat der BB eine IP-Adresse im Hochschulnetz erhalten und besitzt er einen eindeutigen Hostnamen (z.B. `einzigartiger_bb`), so kann von einem anderen PC im Hochschulnetz dieser BB auch ohne IP-Adresse

5 Die Kommandozeile nennt man auch „Shell“. Das Programm auf dem BB, welches die Kommandos verarbeitet, wird „Bash“ genannt. Lassen Sie sich nicht irritieren, wenn diese beiden Begriffe oft gleichbedeutend verwendet werden. Das hierzu gehörende Protokoll heißt „SSH“.

über `einzigartiger_bb.local` erreicht werden (siehe auch Abschnitt 5.2.2).

Besteht kein Zugriff auf den Router des Netzwerks (wie beim Hochschulnetzwerk) und gibt es keinen eindeutigen Hostnamen, dann ist eine zumindest temporäre USB-Kommunikation nötig, um die IP-Adresse des BB herauszufinden.

Bei einer mobilen Stromversorgung bietet sich eine WLAN-Kommunikation an. Jedoch ist diese im PAT mit vielen WLAN-Teilnehmern erheblich langsamer und instabiler als eine USB-Verbindung.

Tipp:

Für die Einarbeitung am BB ist die USB-Verbindung die beste Option. Eine WLAN-Kommunikation sollte nur verwendet werden, wenn eine drahtgebundene Kommunikation nicht möglich ist.

Für die Stromversorgung sollte dann die 5 V-Buchse verwendet werden. Die Versorgungsspannung wird hier über den Pin P9_5 oder P9_6 (VDD_5V) in den Power Management Chip des BB eingespeist.

5.1 Kommunikation via USB

Die Kommunikation geschieht hier über eine durch die USB-Schnittstelle emulierte Ethernetschnittstelle.

Achtung:

Häufig findet man Mikro-USB-Kabel, wie sie beispielsweise Power Banks beiliegen, bei denen nur die Stromversorgung jedoch nicht die beiden Kommunikationsadern angeschlossen sind. Mit solchen Kabeln kann selbstverständlich keine Kommunikation mit dem BB hergestellt werden.

Nach dem Verbinden des USB-Kabels bootet der BB, und nach einigen zehn Sekunden erscheint auf dem PC zuerst das Verzeichnis BEAGLEBONE als Massenspeicher und dann die Meldung über zwei neue Ethernetverbindungen `eth0` und `eth1`. Zu einer der beiden Ethernetverbindungen kann der PC jedoch keine Verbindung aufbauen. Die Fehlermeldungen „Verbindung gescheitert“ dazu können ignoriert werden.

Nun kann über die IP-Adresse `192.168.6.2` eine Verbindung vom PC zum BB aufgebaut werden. Der Status und die Qualität der Verbindung kann vorab in einem Terminalfenster (dafür `strg + alt + t` auf dem PC eingeben) mit dem Befehl `ping 192.168.6.2` getestet werden (Abbruch mit `strg + c`).

Gibt man `192.168.6.2/bone101` in die Adresszeile des Browsers ein, dann wird die `beagleboard.org`-Seite angezeigt. Dabei handelt es sich nicht um eine Seite aus dem Internet, sondern die Seite wird aus lokalen Verzeichnissen des BB aufgerufen. Auf diesen „Internetseiten“ steht alles Weitere, um sich mit dem BB vertraut zu machen.

Über die Adresse `192.168.6.2` kann man sich jetzt auch via SSH-Protokoll⁶ auf dem BB in sein Linuxbetriebssystem einloggen (Benutzername `beagle`, Passwort `tempwd`). Dafür öffnet man ein Terminalfenster und gibt den Befehl `ssh beagle@192.168.6.2` ein.

```
mackst@tec-04-206-02:~$ ssh beagle@192.168.6.2
Ubuntu 18.04.3 LTS
BeagleBoard.org ROS Image 2019-10-21
Support/FAQ: http://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack_Debian
default username:password is [beagle:tempwd]
beagle@beaglebone.local's password:
Last login: Mon Feb 17 16:58:46 2020 from 192.168.6.1
beagle@beaglebone:~$
```

(Beim ersten Mal muss vor dem Passwort noch eine Sicherheitsabfrage mit `yes` beantwortet werden.)

Das Feedback im Terminalfenster an sich ist Dienstprogramm des BB: Ein solches Programm nennt man „Shell“. Im speziellen Fall hier wird die Shell mit dem Namen „Bash“ verwendet.

Genauso gut kann man aufeinanderfolgende Befehlszeilen aber auch in einer Textdatei abspeichern. Dann kann diese Textdatei als „Shell“- bzw. „Bash-Skript“ ausgeführt werden: Hier werden die einzelnen Befehle Zeile für Zeile automatisch abgearbeitet. Solche Skriptbefehle sind auch in der (durch den „.“ versteckten) Datei `.bashrc` enthalten. Diese werden automatisch beim Öffnen eines neuen Terminalfensters ausgeführt.

Achtung:

Zum Ausschalten darf der BB nicht einfach nur von der USB-Schnittstelle bzw. Power Bank (=Spannungsversorgung) getrennt werden, so wie man es bei einem Arduino macht. Da beim BB ein Betriebssystem mit im Spiel ist, muss dieses wie bei einem PC vor dem Trennen heruntergefahren werden. Dies geschieht durch kurzes Drücken der „POWER“ Taste am BB (Taster direkt neben dem Ethernetanschluss).

Falls das Ausschalten über die Power-Taste nicht funktioniert, kann im Terminalfenster der Befehl `sudo`

⁶ Dies nennt man auch „SSH Shell“: Man kommuniziert innerhalb eines PC-Terminalfensters mit dem Linuxbetriebssystem des BB über Tastaturbefehle mittels SSH-Protokoll.

`shutdown -h now` verwendet werden. Durch langes Drücken (>8 s) der POWER-Taste wird der BB „hart“ heruntergefahren.

Mit dem Befehl `reboot` kann der BB neu gestartet werden. Das selbe bewirkt die RESET-Taste.

Ist der BB „nur“ über USB angeschlossen, dann besitzt er standardmäßig keinen Internetzugang. Dafür kann man ihn z.B. zusätzlich (oder ausschließlich, dann aber mit Netzteil) via Ethernetkabel an einen Switch oder Router anschließen.

Alternativ kann er auch via USB die Internetverbindung des PCs (z.B. über das Hochschulnetzwerk) mitbenutzen: Dazu ist etwas Konfigurationsarbeit nötig, die im Buch von D. Molloy im Kapitel 2 detailliert beschrieben ist [2].

Tipp:

Die manchmal recht langen Linuxbefehle aus Webseiten oder aus dieser Anleitung kann man über Copy & Paste in das Terminalfenster übertragen.

Wenn der Terminal-Multiplexer `Terminator` verwendet wird, ist es mit viel Tipparbeit verbunden in jeder einzelnen Konsole die SSH-Verbindung aufzubauen. Dafür gibt es das Bash-Skript `bb_conn_usb.sh`. Hiermit muss in jeder Konsole nur noch der Befehl `./bb_conn_usb.sh` aufgerufen werden. Quelltext siehe Abschnitt 11.15.

5.2 Kommunikation via Ethernet über Switch im selben Netzwerk

Alternativ (und auch zusätzlich!) zu USB kann der BB auch via Ethernet angeschlossen werden. Dabei handelt es sich dann um eine echte und nicht nur emulierte Ethernetschnittstelle.

Der BB muss zuerst extern mit Spannung versorgt werden, was z.B. über eine Power Bank oder über ein USB-Ladegerät inkl. Ladekabel am USB-Anschluss geschehen kann. (Der USB-Anschluss ist in diesem Fall eine reine Stromversorgungsschnittstelle!) Alternativ kann die Versorgungsspannung auch über VDD_5V (P9_5 bzw. P9_6) bzw. über die 5 V Buchse falls vorhanden eingespeist werden.

Dann wird der BB mit einem Patchkabel über einen Switch mit dem Hochschulnetzwerk verbunden, damit sich im selben Netzwerk wie der PC befindet. Der BB erhält vom Hochschulnetz anschließend eine freie IP-Adresse zugewiesen (wird als „DHCP“ bezeichnet).

Achtung:

Je nach Einstellungen des Routers (beim Hochschulnetzwerk auf jeden Fall) erhält der BB jedes Mal eine neue IP-Adresse, wenn er sich z.B. nach einem Reboot erneut im Netzwerk einbucht. Hat er einen eindeutigen Hostnamen (also nicht „beaglebone“ wie voreingestellt), dann kann der BB mit dem Befehl `ssh beagle@xxx.local` über seinen Hostnamen xxx verbunden werden [6].

5.2.1 Ermitteln der IP-Adresse des BB

Welche Adresse IP-Adresse der BB erhalten hat, kann man am PC über den Befehl `ping beaglebone.local` erfahren.

Wenn dies nicht funktioniert, dann loggt man sich am besten über die USB-Verbindung `192.168.6.2` ein und fragt über den Befehl `ifconfig -a` die Netzwerkverbindungen des BB ab, siehe Abschnitt 5.3.1.

5.2.2 Anschließen mehrerer BB via Ethernet und eigenen Hostnamen erstellen

Beim PAT sind mehrere BB mit dem selben Hostname „beaglebone“ im selben Netz. Deshalb sollte der eigene BB einen eindeutigen Hostname erhalten um ihn damit im Netzwerk ausfindig zu machen:

Hierfür müssen im Ordner `/etc` die beiden Dateien `hostname` und `hosts` editiert werden, indem der alte Hostname `beaglebone` durch den neuen ersetzt wird.

```
sudo nano /etc/hostname  
sudo nano /etc/hosts
```

Im Anschluss muss entweder einen Reboot oder den Befehl `sudo hostname -F /etc/hostname` ausgeführt werden. Im Terminalfenster erscheint als neuer Promt anschließend `beagle@` gefolgt vom neuen Hostnamen.

Kurzreferenzen wie der Editor `nano` zu bedienen ist, finden sich im Abschnitt 11.4 oder im Internet.

Ob der BB Verbindung zum Internet hat, kann über den Linuxbefehl `ping www.google.com` getestet werden. Damit überprüft man erstens den DNS-Server und zweitens das Zustandekommen einer Kommunikation mit einer IP-Adresse von Google, von deren ständiger Erreichbarkeit auszugehen ist.

5.3 Kommunikation via WLAN

Es ist am einfachsten, den BB via USB mit dem PC zu verbinden, denn in diesem Fall erfolgt sowohl die Stromversorgung als auch die Kommunikation via USB. Diese Verbindung ist optimal vom Einbinden der Sensoren bis zu den Plausibilitätsprüfungen des Gesamtsystems mit aufgebocktem Roboterfahrzeug.

Tipp:

Verwenden Sie wenn immer es geht die USB-Verbindung, da diese leistungsstärker und weniger störanfälliger ist als die WLAN-Verbindung.

Um jedoch das Roboterfahrzeug im fahrenden Betrieb zu optimieren, muss eine Drahtlosverbindung verwendet werden. Zum Glück ist der BB mit einem Linuxbetriebssystem ausgestattet: Denn für den Umstieg auf WLAN ist am BB wie auch am PC nur ein normaler WLAN-Stick bzw. eine WLAN-PCI-Karte nötig.

Der BB kann als WLAN Accesspoint eingerichtet werden, in dessen WLAN sich der PC einbucht. In [19] ist die Vorgehensweise am Beispiel eines RasPi detailliert beschrieben. Diese Art der WLAN-Kommunikation hat sich jedoch als nicht ausreichend stabil erwiesen.

Daher werden im PAT mehrere einfache WLAN-Router (ohne Internetanschluss) verwendet, in die sich jeweils sowohl der PC als auch der BB einbuchen (siehe Abb. 2).

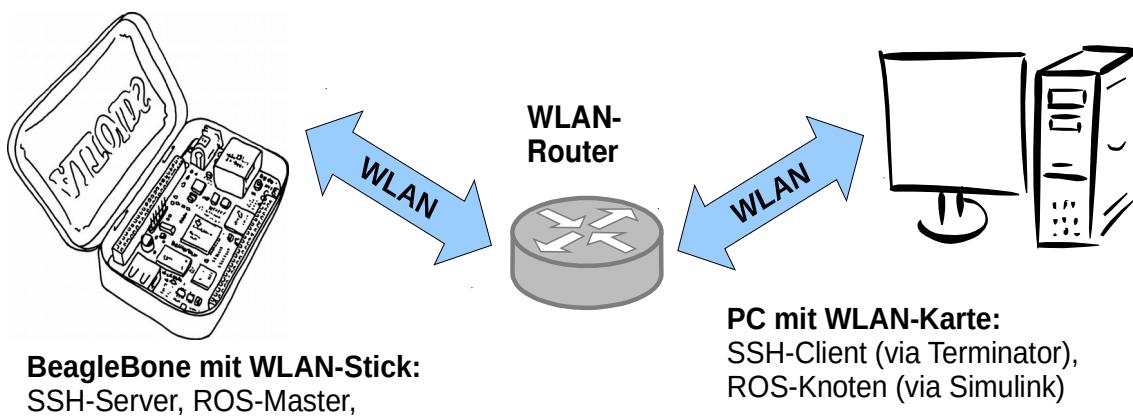


Abbildung 2: Kommunikation des BB via WLAN mit einem PC.

Achtung:

Bitte verbinden Sie den PC und den BB mit dem räumlich nächstgelegenen Router, damit die unterschiedlichen BB gleichmäßig auf die Router verteilt sind.

5.3.1 Mit dem BB in ein vorhandenes WLAN einwählen

Die nachfolgend genannte Prozedur wurde mit einem WLAN-Stick von Edimax, Modell EW-7811Un durchgeführt. Dieser sollte vom BB-Betriebssystem automatisch erkannt und eingebunden werden, da der nötige Treiber (RTL8192CU) dort schon vorhanden ist.

Detailliert ist der Aufbau einer WiFi-Verbindung im Buch von D. Molloy [2] in Kapitel 12 beschrieben.

Zuerst muss sichergestellt werden, dass das Betriebssystem über den USB-Bus den WLAN-Stick während des Bootens überhaupt erkennt und den obigen Treiber geladen hat.

Dazu sollte man den WLAN-Stick erst nach dem Booten einstecken und danach in der Konsole mit dem Befehl `dmesg` nachschauen, ob folgende Meldung vom Kernel ausgegeben wird - die jetzt in der sehr großen Liste an Zeilen ganz unten steht:

```
[ 1106.244567] usb 1-1: new high-speed USB device number 2 using musb-hdrc
[ 1106.394189] usb 1-1: New USB device found, idVendor=7392, idProduct=7811, bcdDevice=2.00
[ 1106.394212] usb 1-1: New USB device strings: Mfr=1, Product=2, SerialNumber=3
[ 1106.394223] usb 1-1: Product: 802.11n WLAN Adapter
[ 1106.394232] usb 1-1: Manufacturer: Realtek
[ 1106.394242] usb 1-1: SerialNumber: 00e04c000001
[ 1106.706044] cfg80211: Loading compiled-in X.509 certificates for regulatory database
[ 1106.723692] cfg80211: Loaded X.509 cert 'sforshee: 00b28ddf47aef9cea7'
[ 1107.165857] rtl8192cu: Chip version 0x10
[ 1107.292687] rtl8192cu: Board Type 0
[ 1107.292942] rtl_usb: rx_max_size 15360, rx_urb_num 8, in_ep 1
[ 1107.293189] rtl8192cu: Loading firmware rtlwifi/rtl8192cufw_TMSC.bin
[ 1107.321018] ieee80211 phy0: Selected rate control algorithm 'rtl_rc'
```

```
[ 1107.355821] rtl18192cu: MAC auto ON okay!
[ 1107.390561] usbcore: registered new interface driver rtl18192cu
```

Zusätzlich kann man auch mit `lsusb` prüfen, ob er als USB-Gerät angemeldet ist.

```
beagle@meinbeaglebone:~$ lsusb
Bus 001 Device 002: ID 7392:7811 Edimax Technology Co., Ltd EW-7811Un 802.11n Wireless Adapter [Realtek RTL8188CUS]
Bus 001 Device 001: ID 1d6b:0002 Linux Foundation 2.0 root hub
```

Mit `ifconfig -a` wird geprüft, welches „Netzwerk Device“ nun dem WLAN-Stick zugeordnet wurde. In den Beispiel unten hat er den Namen „`wlan0`“ erhalten.

Achtung:

Jeder WLAN-Stick (selbst baugleiche) hat eine andere MAC-Adresse. Wenn man verschiedene WLAN-Sticks nacheinander mit dem BB verbindet, dann erhält der erste den Namen „`wlan0`“, der zweite „`wlan1`“ usw. Daher ist es wichtig, den Namen des aktuellen WLAN-Sticks zu kennen - denn man weiß ja nicht unbedingt, wie viele andere WLAN-Sticks schon vorher verbunden waren.

```
beagle@beaglebone:~$ ifconfig
eth0: flags=-28669<UP,BROADCAST,MULTICAST,DYNAMIC> mtu 1500
      ether 84:eb:18:e3:6c:bb txqueuelen 1000 (Ethernet)
      RX packets 0 bytes 0 (0.0 B)
      RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
      TX packets 0 bytes 0 (0.0 B)
      TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0
      device interrupt 55

lo: flags=73<UP,LOOPBACK,RUNNING> mtu 65536
      inet 127.0.0.1 netmask 255.0.0.0
      inet6 ::1 prefixlen 128 scopeid 0x10<host>
          loop txqueuelen 1000 (Local Loopback)
          RX packets 2928 bytes 179109 (179.1 KB)
          RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
          TX packets 2928 bytes 179109 (179.1 KB)
          TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0

usb0: flags=4163<UP,BROADCAST,RUNNING,MULTICAST> mtu 1500
      inet 192.168.7.2 netmask 255.255.255.252 broadcast 192.168.7.3
      inet6 fe80::86eb:18ff:fee3:6cbd prefixlen 64 scopeid 0x20<link>
          ether 84:eb:18:e3:6c:bd txqueuelen 1000 (Ethernet)
          RX packets 1 bytes 96 (96.0 B)
          RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
          TX packets 43 bytes 9762 (9.7 KB)
          TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0

usb1: flags=4163<UP,BROADCAST,RUNNING,MULTICAST> mtu 1500
      inet 192.168.6.2 netmask 255.255.255.252 broadcast 192.168.6.3
      inet6 fe80::86eb:18ff:fee3:6cc0 prefixlen 64 scopeid 0x20<link>
          ether 84:eb:18:e3:6c:c0 txqueuelen 1000 (Ethernet)
          RX packets 750 bytes 57653 (57.6 KB)
          RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
          TX packets 601 bytes 108516 (108.5 KB)
          TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0

wlan0: flags=-28605<UP,BROADCAST,RUNNING,MULTICAST,DYNAMIC> mtu 1500
      inet 192.168.178.71 netmask 255.255.255.0 broadcast 192.168.178.255
      inet6 fe80::76da:38ff:fe05:5bb prefixlen 64 scopeid 0x20<link>
          ether 74:da:38:05:05:bb txqueuelen 1000 (Ethernet)
          RX packets 279 bytes 27841 (27.8 KB)
          RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
          TX packets 75 bytes 12953 (12.9 KB)
          TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0
```

Im Beispiel oben hat der BB nur über den `usb1`-Anschluss eine IP-Verbindung (Adresse `192.168.6.2`) und dadurch eine IP-Adresse. Der WLAN-Stick hat vom Router die IP-Adresse `192.168.178.71` erhalten und ist somit mit dem WLAN-Netzwerk verbunden.

Wird der BB zusätzlich über Netzwerkkabel an einem Router angeschlossen, so ändert sich `eth0` im Vergleich zu oben: Nun hält die Schnittstelle `eth0` ebenfalls eine IP-Verbindung (192.168.178.51).

```
eth0: flags=-28605<UP,BROADCAST,RUNNING,MULTICAST,DYNAMIC> mtu 1500
      inet 192.168.178.51 netmask 255.255.255.0 broadcast 192.168.178.255
      inet6 fe80::86eb:18ff:fee3:6cbb prefixlen 64 scopeid 0x20<link>
        ether 84:eb:18:e3:6c:bb txqueuelen 1000 (Ethernet)
          RX packets 34 bytes 4287 (4.2 KB)
          RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
          TX packets 67 bytes 11115 (11.1 KB)
          TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0
          device interrupt 55
```

Mit dem Befehl `iwconfig` werden anders als bei `ifconfig` nur die Drahtlosverbindungen abgefragt:

```
lo      no wireless extensions.
usb1    no wireless extensions.
can1    no wireless extensions.
eth0    no wireless extensions.
wlan0   IEEE 802.11 ESSID:"Wehlan"
        Mode:Managed Frequency:2.412 GHz Access Point: E8:DE:27:55:A1:60
        Bit Rate=1 Mb/s Tx-Power=20 dBm
        Retry short limit:7 RTS thr=2347 B Fragment thr:off
        Power Management:off
        Link Quality=70/70 Signal level=-26 dBm
        Rx invalid nwid:0 Rx invalid crypt:0 Rx invalid frag:0
        Tx excessive retries:0 Invalid misc:4 Missed beacon:0
can0    no wireless extensions.
usb0    no wireless extensions.
```

Um dem BB mitzuteilen sich mit einem bestimmten WLAN `wifi_xyz` zu verbinden, wird das Hilfsprogramm `connmanctl` (unbedingt mit `sudo` starten!) auf dem BB verwendet:

```
sudo connmanctl
connmanctl> scan wifi
Scan completed for wifi
connmanctl> services
  wifi_xyz           wifi_08beac010900_5765686c616e_managed_psk
  FRITZ!Box 6490 Cable wifi_08beac010900_465249545a21426f782036343930204361626c65
```

Auf das jeweilige WLAN wird über dessen Kennung rechts neben der gewünschten SSID zugegriffen. Diese kann mit TAB-Vervollständigung eingegeben werden.

Mit dem Befehl

```
services wifi_08beac010900_5765686c616e_managed_psk
```

werden alle Infos zu dem betreffenden WLAN wie z.B. die Signalstärke angezeigt. Zum Verbinden einer gesicherten WLAN-Verbindung muss vorher ein `agent` eingeschaltet werden:

```
connmanctl> agent on
connmanctl> connect wifi_08beac010900_5765686c616e_managed_psk
Passwort eingeben
connmanctl> agent off
connmanctl> services
*AO wifi_xyz           wifi_08beac010900_5765686c616e_managed_psk
```

Hier bedeutet der * „bevorzugtes WLAN“, das A „automatisches Verbinden“, das R „Ready“ (IP-Adresse von Router erhalten) und das O „Online“. R bedeutet auch mit dem WLAN verbunden zu sein, O erscheint erst dann, wenn bestimmte IP-Adressen von `connman` erreicht wurden, was nicht relevant für das PAT ist. Details siehe [20]. Falls kein A erscheint, kann das automatische Verbinden mit folgendem Befehl aktiviert werden:

```
connmanctl> config wifi_08beac010900_5765686c616e_managed_psk autoconnect on
```

`connmanctl` wird mit dem Befehl `exit` beendet:

```
connmanctl> exit
```

Nun kann man mit `ifconfig wlan0` nachschauen, welche IP-Adresse der BB vom Router erhalten hat:

```
beagle@beaglebone:~$ ifconfig wlan0
wlan0: flags=-28605<UP,BROADCAST,RUNNING,MULTICAST,DYNAMIC> mtu 1500
```

```

inet 192.168.178.71 netmask 255.255.255.0 broadcast 192.168.178.255
inet6 fe80::76da:38ff:fe05:5bb prefixlen 64 scopeid 0x20<link>
ether 74:da:38:05:05:bb txqueuelen 1000 (Ethernet)
RX packets 955 bytes 88593 (88.5 KB)
RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
TX packets 157 bytes 27200 (27.2 KB)
TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0

```

Jetzt besitzt der BB in diesem konkreten Beispiel also zusätzlich die IP-Adresse 192.168.178.71, die über WLAN zu erreichen ist. Diese kann nun auch für die SSH-Verbindung statt der USB-IP-Adresse 192.168.6.2 verwendet werden. Nach ca. einer Minute wird die nun bestehende WLAN-Verbindung auch durch die USR3-LED über ein Blinken mit 1 Hz angezeigt.

Mit dem PC muss man sich nun in das selbe WLAN-Netzwerk einbuchen, damit eine WLAN-Verbindung zum BB entsteht. Ob die Verbindung PC-BB steht, prüft man in diesem Beispiel in einem Terminalfenster mit `ping 192.168.178.71` oder (falls eigener Hostnamen vergeben) `ping einzigartiger_bb.local`.

Achtung:

Wenn Sie den BB später ausschließlich über eine Powerbank versorgen möchten, dann muss die WLAN-Verbindung automatisch nach dem Booten hergestellt werden, da ja für die Kommunikation die USB-Schnittstelle schon belegt ist.

Dafür wurde das Bash-Skript `wifi_reset.sh` erstellt, welches einmal pro Minute von dem Linux-Tool `cron` ausgeführt wird. Quelltext siehe Abschnitt 11.17.

Es überprüft, ob eine WLAN-Verbindung besteht. Falls nicht wird über das Tool `connmanctl` die WLAN-Verbindung neu aufgebaut.

Tipp:

Wenn der Terminal-Multiplexer `Terminator` verwendet wird, ist es mit viel Tipparbeit verbunden in jeder einzelnen Konsole die SSH-Verbindung aufzubauen. Dafür gibt es das Bash-Skript `bb_conn_wifi.sh`. Hiermit muss in jeder Konsole nur noch der Befehl `./bb_con_wifi.sh` aufgerufen werden. **Dabei muss vorher im Bash-Skript jedoch die richtige IP-Adresse bzw. der richtige Hostname editiert werden.** Quelltext siehe Abschnitt 11.15.

5.4 Bekannte Probleme:

- Oft identifizieren Router einen bestimmten BB über dessen MAC-Adresse und weisen ihm immer die selbe IP-Adresse zu. Hat sich der Hostname geändert, dann kann es bei erneutem Verbinden mit dem WLAN Router zu Problemen kommen, weil sich die Kombination aus MAC-Adresse und Hostname geändert hat.
- Wenn die WLAN-Verbindung nicht aufgebaut werden kann, hilft manchmal ein Neustart der connman Services: `sudo systemctl restart connman`
- Das Hilfsprogramm `connmanctl` speichert die bisher hergestellten WLAN-Verbindungen unter `var/lib/connman`. Dort existiert für jede Kennung ein Verzeichnis. Bei Verbindungsproblemen hilft es manchmal das entsprechende Verzeichnis zu löschen, den BB neu zu starten und die Verbindung von Anfang an neu herzustellen.
- Zusammen mit dem WLAN-Dongle kann der BB kurzzeitig einen hohen Strom benötigen. Dies kann je nach Stromversorgung bzw. angeschlossenen Verbrauchern zu einem Absinken der USB-Spannung `SYS_5V` auf unter 4,5 V und damit zu Instabilitäten der WLAN-Verbindung führen.

Tipp:

Manchmal ist es schwierig zu erkennen, ob sich der BB überhaupt in das (richtige!) WLAN eingebucht hat. Wenn Sie ein Smartphone dabei haben, dann können Sie sich mit diesem in das selbe WLAN einbuchen und mit einer Netzwerk-Scanner App (z.B. Fing) nachschauen, ob Ihr BB im selben Netz zu finden ist. Hat Ihr BB keinen eigenen Hostnamen, so können Sie Ihren ihn über dessen MAC-Adresse (des WLAN-Dongles) identifizieren und mit `ping` die Verbindung testen.

6 Umgang mit Linux

Kommt man aus der Welt der Windows/Apple-PCs oder Androidsmartphones, so kann man sich eine Welt ohne grafische Benutzeroberfläche gar nicht mehr vorstellen.

Bei Linux Embedded Systems macht eine solche Benutzeroberfläche jedoch keinen Sinn, da sie nur unnötig Rechenleistung verbraucht, denn sie wird höchstens bei der Parametrierung des fertigen Systems gebraucht. Tatsächlich ist der Umgang mit einer sogenannten "Konsole", bei der in einem Terminalfenster die Befehle in Form von Text statt Mausklicks eingegeben werden, langfristig wesentlich effizienter.

Tipp:

Eine nützliche Funktion ist das automatische Vervollständigen („Tab Completion“) von Verzeichnis- oder Dateinamen:

Bei der Eingabe eines Pfades kann man mit der Tab-Taste die Namen vervollständigen, wenn man die ersten Buchstaben eingegeben hat. Dies funktioniert auch bei allen ROS-Tools.

Auch kann ein aus einem PDF (wie dieses hier) kopierter Befehl mit Copy/Paste in die Linuxkonsole eingefügt werden.

Die im Quellenverzeichnis genannten Fachbücher [21], [4] und [5] enthalten jeweils die wichtigen Infos und Befehle zum Thema Linux. In der Praxis sind Cheat Sheets für Linux sehr nützlich, ein Beispiel hierfür finden Sie im Anhang im Abschnitt 11.5.

6.1 Dateimanagement auf dem BB, Übertragen von Dateien zwischen PC und BB

Vom PC aus kommunizieren Sie mittels SSH-Shell mit dem Linuxbetriebssystem auf dem BB. Dies geschieht wie oben beschrieben über Tastaturbefehle im Terminalfenster. Damit können Dateien innerhalb des BBs verschoben, umbenannt, gelöscht usw. werden.

Möchte man zwischen dem PC und dem BB Dateien übertragen, so kann dies textbasiert innerhalb eines Terminalfensters gemacht werden oder mit einem Linux-PC auch grafikbasiert über den Dateimanager *Nutilus*.

6.1.1 Dateübertragung zwischen PC und BB im Terminalfenster

Hierfür gibt es das Tool *sftp* (Secure File Transfer Protocol).

Bei *sftp* kennt im Prinzip die gleichen Kommandos wie die Bash-Shell (z.B. *pwd*, *ls*, *cd*, *mkdir*, *rm*). Der PC wird als „local machine“ bezeichnet, der BB ist die „remote machine“.

Die Logik hinter *sftp* ist folgende: Wird dem Befehl ein „l“ für „local“ vorangestellt, dann bezieht sich dieser auf den PC. Wenn nicht, dann bezieht sich der Befehl auf den BB.

Zusätzlich gibt es noch die beiden Kommandos *put* und *get*: *put* bewirkt einen Upload vom PC auf den BB und *get* einen Download vom BB auf dem PC, wie folgendes Beispiel zeigt:

```
mackst@tec-04-206-02:~$ sftp beagle@192.168.6.2
sftp> pwd
Remote working directory: /home/beagle
sftp> lpwd
Local working directory: /home/mackst
sftp> put dateiAufPC.py
Uploading dateiAufPC.py to /home/beagle/dateiAufPC.py
dateiAufPC.py                                100%   716    334.1KB/s   00:00
sftp> get dateiAufBB.py
Fetching /home/beagle/dateiAufBB.py to dateiAufBB.py
/home/beagle/dateiAufBB.py                      100%   716    226.5KB/s   00:00
sftp> exit
mackst@tec-04-206-02:~$
```

Es können auch Dateien von einem USB-Stick vom und zum BB kopiert werden. Dazu wird nach dem Einsticken des USB-Sticks mit dem Befehl *fdisk -l* nachgeprüft, ob dieser als */dev/sda1* erscheint. Nun muss der USB-Stick noch „gemountet“ werden, d.h. es muss ein Verzeichnis angelegt werden, über das auf ihn zugegriffen werden kann. Dafür wird z.B. das Verzeichnis */media/usb* angelegt (*mkdir /media/usb*) und anschließend mit dem Befehl *mount /dev/sda1 /media/usb* mit dem USB-Stick verbunden.

6.1.2 Dateübertragung zwischen PC und BB grafikbasiert

Die Übertragung an sich findet hier im Hintergrund auch über die Protokolle *SSH* und *sftp* statt.

Für Windows-PC muss als sogenanntes „Frontend“ die Software WinSCP installiert werden.

Bei einem Ubuntu-PC kann der Standard-Dateimanager *Nautilus* schon mit den o.g. Protokollen umgehen. Um eine Verbindung mit dem BB aufzubauen, wird hier „+ Andere Orte“ ausgewählt. Dann wird in der Eingabezeile „Mit Server verbinden“ die SSH-Adresse des BB *sftp://beagle@192.168.6.2* eingegeben. Nach einem Klick auf „Verbinden“ wird das Passwort abgefragt und anschließend erscheint in *Nautilus* das Dateisystem des BB, mit dem nun genau so gearbeitet werden kann wie mit dem lokalen Dateisystem des Ubuntu-PC.

7 Die Ein- und Ausgänge des BB

Achtung:

Gegenüber früheren BB-Betriebssystemversionen hat sich der Umgang mit den I/Os seit der Kernelversion 3.14 grundlegend geändert: Für die Pinconfiguration wird nicht mehr das Tool *capemanager* sondern das Tool *config-pin* [22] verwendet. Sogenannte "Slots" für (virtuelle) Capes werden durch aktuelle Kernelversionen nicht mehr unterstützt.

Dies ist bei älteren Informationen (vor 2018) aus dem Netz unbedingt zu beachten. Nur die Second Edition des Buchs von C. Molloy [2] ist in Bezug auf I/Os und IP-Kommunikation auf dem aktuellen Stand.

Was das Anschließen von I/O-Peripherie wie Sensoren betrifft, ist dieses Kapitel von sehr großer Bedeutung. Denn viele Kompilier- und Laufzeitfehler beruhen auf Konflikten bei der Pinconfiguration.

Grundsätzlich sind auf den beiden zweireihigen Buchsenleisten P8 und P9, den sogenannten „Cape Expansion Headers“ Versorgungsspannungen (3,3 und 5 V), Masse, Resets, Analogeingänge und GPIO herausgeführt.

Die Abkürzung GPIO bedeutet „General Purpose Input Output“. In der Literatur werden damit aber oft nur die binären (digitalen) I/Os bezeichnet. Auch in den Abbildungen in Abschnitt 11.1 sind mit „GPIO“ nur diese binären Schnittstellen gemeint. GPIO können aber auch als CAN-, I²C-, UART-, SPI-Schnittstelle oder oder als Timer konfiguriert werden.

Die Zuordnung der unterschiedlichen GPIO-Funktionen zu den einzelnen Buchsen von P9 und P8 wird "Pinconfiguration" genannt. Allgemein spricht man hier von „Pin Muxing“, zu Deutsch „Anschlussmultiplexing“.

Eigentlich bräuchte man bei Linux für unterschiedliche Pinconfigurationen unterschiedliche Kernels (=Betriebssystemversionen). Normalerweise ist die Pinzuordnung also im Betriebssystem = Kernel festgelegt. Aufgrund der vielen verschiedenen ARM-Prozessoren wären folglich viele verschiedene Kernelversionen nötig. Um dies zu umgehen, wurde der sogenannte "**Device Tree (DT)**" eingeführt: Hier wird einem einheitlichen Kernel beim Bootvorgang die gewünschte (nicht einheitliche) Pinconfiguration mitgeteilt und gleichzeitig auch die nötigen Kernelmodule dafür geladen. Nach dem Booten hat also jeder Pin eine Default-Konfiguration. Auch nach dem Booten kann die Pinconfiguration mit dem Tool *config-pin* noch geändert werden. Man spricht dann von einem "**Device Tree Overlay (DTO)**", der geladen wird.

Der Zugriff auf die binären I/O (Schalteingänge, Schaltausgänge), den ADC und den PWM-Ausgang ist bei allen LES über das **Sys File System** möglich (siehe Abschnitt 7.3):

Das Setzen eines binären Ausgangs oder das Auslesen einer gewandelten Eingangsspannung ist somit nichts Anderes als das Schreiben oder Lesen einer entsprechenden virtuellen Datei im Linux-Dateisystem. Dieses virtuelle Dateisystem wird „Sys File System“ genannt.

Daher benötigt man für die binären I/Os, den ADC und PWM (=DAC) sowohl für die Programmiersprache C als auch für Python prinzipiell keinen Treiber, denn es sind nur Schreib- oder Lesebefehle auf Dateien notwendig. Diese Programmierschnittstelle wird oft auch als "SysFS-API" bezeichnet.

Damit die entsprechenden virtuellen Dateien überhaupt im Linux-Dateisystem auftauchen, muss vorher der DT (beispielsweise für den ADC oder den PWM) geladen werden.

Geschieht dies beim Booten, dann spricht man von "Device Tree". Geschieht dies mit dem Tool config-pin nach dem Booten, dann spricht man von "Device Tree Overlay".

Im PAT werden die benötigten Schnittstellen auf letztere Weise "bei Bedarf" innerhalb der Programme zu deren Laufzeit über das Aufrufen von config-pin konfiguriert. Die analogen Eingänge, der I²C Bus 2 sowie die binären I/O sind schon durch den DT direkt nach dem Booten konfiguriert.

Die Schnittstellen SPI, I²C, UART, USB und Ethernet benötigen zusätzlich Treiberbibliotheken. In Python verwendet man der Einfachheit halber gemeinsame Bibliotheken für alle Schnittstellen (GPIO bis I²C), die teils sogar wie die BBIO-Bibliothek das Laden der nötigen Pinconfiguration via *config-pin* mit übernehmen.

In dem Buch von D. Molloy [2] sind in Kapitel 6 die Ein- und Ausgänge des BB sowie das Tool *config-pin* recht gut beschrieben. Außerdem findet sich auf seinen Internetseiten zu Kapitel 6 des Buchs („Interfacing to BeagleBone Busses“) [23] tabellarische Übersichten zu den erlaubten und möglichen Pinbelegungen, die auch in Abschnitt 11.8 abgebildet sind.

Recht hilfreich sind auch Aufkleber mit den Pinnummern, die man an die beiden Buchsenleisten klebt. Man kann sie als PDF-Datei unter [24] oder [25] herunterladen.

Im PAT werden jedoch diese Pins nicht direkt über die Buchsenleisten sondern geschützt über die

Grove-Stecker des Grove-Capes kontaktiert.

Achtung:

Leider ist die ganze Geschichte mit den DT und DTO in der Realität nicht so sauber implementiert wie oben beschrieben. Bei einigen Images ist die Pinzuordnung dann doch Teil des Kernels und das zusätzliche Laden eines DT bzw. DTO hat nicht den gewünschten Effekt.

Bestimmte Pins wie z.B. P8_20 bis P8_25, die Schnittstellen zum eMMC (siehe Abschnitt 11.8) dürfen nicht umkonfiguriert werden.

Beim Verwenden von *config-pin* besteht immer die Gefahr, eine vorher gesetzte Pin-Konfiguration ungewollt zu überschreiben.

Daher wird empfohlen, die Pin-Konfiguration des BB-Images für das PAT so zu verwenden wie sie in Abschnitt 7.2 dokumentiert ist.

7.1 Verwendung des Tools config-pin

Wie in [22] beschrieben basiert dieses Tool auf einem DTO mit Namen "cape-universal".

Mit dem Befehl *config-pin -h* wird die Hilfefunktion aufgerufen und die Befehlssyntax aufgelistet.

7.1.1 Anzeigen des aktuell geladenen Pinkonfiguration

Mit dem Befehl *config-pin -i px.y* erhält man eine allgemeine Information über den Pin Nr. y auf der Buchsenleiste x. Insbesondere werden dabei die verschiedenen Modi (z.B. i2c, can, spi_cs) aufgelistet, auf die der entsprechende Pin mit *config-pin -a px.y ...* konfiguriert werden kann.

```
beagle@beaglebone:~$ config-pin -i p8.08
Pin name: P8_08
Function if no cape loaded: gpio
Function if cape loaded: default gpio gpio_pu gpio_pd gpio_input timer
Function information: gpio2_3 default gpio2_3 gpio2_3 gpio2_3 gpio2_3 timer7
Kernel GPIO id: 67
PRU GPIO id: 99
```

Der Befehl *config-pin -q px.y* liest die aktuelle Pin-Konfiguration aus:

```
beagle@beaglebone:~$ config-pin -q p8.08
P8_08 Mode: default Direction: in Value: 1
```

Dies funktioniert auch mit anderen als den GPIO-Pins:

```
beagle@beaglebone:~$ config-pin -i p9.35
Pin is not modifiable: P9_35 AIN6
```

```
beagle@beaglebone:~$ config-pin -i p9.19
Pin name: P9_19
Function if no cape loaded: i2c
Function if cape loaded: default gpio gpio_pu gpio_pd gpio_input spi_cs can i2c pru_uart
timer
Function information: i2c2_scl default gpio0_13 gpio0_13 gpio0_13 gpio0_13 spi1_cs1
dcan0_rx i2c2_scl pru_uart timer5
Kernel GPIO id: 13
PRU GPIO id: 45
```

Soll die Konfiguration aller Pins übersichtsweise ausgegeben werden, so kann das Tool *show-pins* verwendet werden, welches über *config-pin*-Kommandos alle Pins nacheinander abfragt. In Abschnitt 11.9 ist ein Beispiel dargestellt.

7.1.2 Setzen von Pinfunktionen und -werten

Bei einfachen GPIO-Pins kann mit *config-pin* deren Funktion als Eingang *in* oder Ausgang *out* gesetzt werden. Anschließend kann für einen Eingang ein Pull-Up-Widerstand mit *in+* oder oder ein Pull-Down-Widerstand mit *hi-* gesetzt werden. Mit dem Befehl *config-pin -q* wird dann der Eingangswert des Pins ausgegeben (hier als Beispiel einmal Pin 8_11 mit Pull-Down auf GND bzw. mit Pull-Up auf 3,3 V).

```
beagle@beaglebone:~$ config-pin p8.11 in
beagle@beaglebone:~$ config-pin p8.11 in+
beagle@beaglebone:~$ config-pin -q p8.11
P8_11 Mode: gpio_pu Direction: in Value: 0
beagle@beaglebone:~$ config-pin -q p8.11
```

```
P8_11 Mode: gpio_pu Direction: in Value: 1
```

Ein GPIO als Ausgang kann mit den Werten 1 und 0 auf High oder Low gesetzt werden.

```
beagle@beaglebone:~$ config-pin p8.08 out  
beagle@beaglebone:~$ config-pin p8.08 1  
beagle@beaglebone:~$ config-pin p8.08 0
```

Funktionalitäten wie PWM oder I²C können mit *config-pin* den dafür in Frage kommenden Pins zugewiesen werden. Im nachfolgenden Beispiel wird dem Pin 9_22 die PWM-Funktion zugewiesen.

```
beagle@beaglebone:~$ config-pin -q p9.22  
P9_22 Mode: default Direction: in Value: 1  
beagle@beaglebone:~$ config-pin -a p9.22 pwm  
beagle@beaglebone:~$ config-pin -q p9.22  
P9_22 Mode: pwm
```

7.2 Die Standard Pinkonfiguration für das PAT

Verwenden Sie möglichst diese Pinbelegung und Kontaktierung über die Grove-Stecker während der gesamten Projektarbeit. Damit haben Sie schon eine Hauptfehlerquelle beseitigt! In den Programmen werden die Pin mit *config-pin* entsprechend konfiguriert, falls noch nicht durch das DT beim Booten geschehen.

GPIO siehe Abschn. 11.8	Entsprechende Pins der Buchsenleiste am BB	Beschriftung Grove-Stecker auf Cape Version 2	Primäre Verwendung im PAT und Alternative dazu
30 RX, 31 TX	P9_11 RX, P9_13 TX, VCC, GND	UART/Digital links (UART4)	UART4 ⁷ , alt. bin. I/O
14 RX, 15 TX	P9_26 RX, P9_24 TX, VCC, GND	UART/Digital rechts (UART1)	bin. I/O, alt. UART, I ² C, CAN
-	P9_37-40, VCC, GND	Analog Input	Analog In
51	P9_16, NC, VCC, GND	GPIO 51	PWM, alt. bin. I/O
50	P9_14, P9_16, VCC, GND	GPIO 50	PWM, alt. bin. I/O
117	P9_25, P9_14, VCC, GND	GPIO 117	bin. I/O bevorzugt Ausgang
115	P9_27, P9_25, VCC, GND	GPIO 115	bin. I/O bevorzugt Eingang
13 CL, 12 DA	P9_19 CL, P9_20 DA, VCC, GND	I ² C2 (Hub für 4 Slaves)	I ² C2, alt. CAN, Timer
84 CL, 85 D0	SPI: P9_22 CL, P9_21 D0 UART: P9_22 RX, P9_21 TX	Oberer Stecker auf BBG-Board neben USER-Button (UART2)	SPI0 zusammen mit P9_17 CS, P9_18 D1, alt. UART, PWM
13 CL, 12 DA	Selbe Belegung wie I ² C2	Unterer Stecker auf BBG-Board (I ² C2)	I ² C2, alt. CAN, Timer
-	P9_7, P9_8 (SYS_5V)	VCC (Schalter auf 5V)	5 V Versorgung des BB und I/O-Peripherie via USB (500 mA max.)
-	P9_5, P9_6 (VDD_5V)	Kein Anschluss auf Cape. 5 V Spannungsversorgung Input (4,3...5,8 V) über Power Management Chip des BB	5 V Versorgung des BB und I/O-Peripherie via Power Bank (1 A max.), Rundbuchse falls vorhanden
-	P9_3, P9_4 (DC_33V, VDD_3V3)	VCC (Schalter auf 3V3)	Spannungsversorgung I/O-Peripherie

7.3 Das SysFS

Unter Linux wird auf die binären I/Os, den ADC und den PWM (=DAC) über Lese- und Schreibbefehle auf virtuelle Dateien (das System File System kurz SysFS) zugegriffen. Vorher muss jedoch die benötigte Pinkonfigurationen über den DT bzw. DTO (mit dem Tool *config-pin*) gesetzt sein.

Jeder Schnittstelle ist im Verzeichnis in /sys/class/ ein entsprechender Ordner zugeordnet. In dessen Dateien kann man Werte hineinschreiben um z.B. einen binären Ausgang auf High zu setzen. Genauso kann man eine Datei auslesen, um den Wert des ADCs zu erhalten. Das Datei System nennt man „SysFS“. Es ist eine Besonderheit des Linuxbetriebssystems.

⁷ Bei manchen Grove Cape Version 2 ist diese Anschluss elektronisch durch defekte Pegelwandler gestört. In diesem Fall über die Buchsenleisten verbinden oder den UART2-Anschluss auf dem BB-Board verwenden.

Das SysFS ist also ein virtuelles Dateisystem, über das man **als User** direkt auf Betriebssystemfunktionen zugreift, um über die I/Os zu kommunizieren.

Dieser Umgang mit den I/Os durch das Betriebssystem ist also grundsätzlich bei allen LES gleich. Schreibt man ein C-Programm, dass in dieser Weise die Schnittstellen anspricht, so ist es einfach auf ein anderes LES portierbar. Daher unterscheidet sich der C- oder Pythonquellcode für einen BB nicht wesentlich von dem für einen RasPi abgesehen von einigen hardwarespezifischen Bibliotheken.

In den Beispielprogrammen des PAT erfolgt der Zugriff auf die I/Os teils über dieses SysFS. Die folgenden Beispiele verdeutlichen, wie in einem Terminalfenster mit Linuxbefehlen auf das SysFS zugegriffen wird.

Beispiel 1:

Binärer Eingang P8_11 (GPIO 45, PIN 13, siehe Abschnitt 11.8):

```
cd /sys/class/gpio  
ls
```

Der obige Befehl listet die "exportierten" GPIO auf. Nach dem Booten des PAT-Image gehören fast alle GPIO dazu. Maximal erscheinen hier 4 x 32 GPIO der vier GPIO-Chips 0, 32, 64 und 96. Es sind aber nicht alle dieser möglichen GPIO überhaupt auf die Buchsenleisten herausgeführt oder im DT nach dem Booten als GPIO konfiguriert.

Auf einen dieser GPIO wird mit folgenden Schreib-/Lese-Befehlen zugegriffen (hier Konfiguration als Input und Auslesen des Eingangssignals):

```
cd gpio45  
echo in > direction  
cat value
```

PIN 13 ist genau genommen GPIO1_13, also Pin 13 des ersten GPIO-Controllers. Die GPIO 45 ergeben sich aus dem Offset von 32 (jeder Controller hat 32 Pins) plus 13.

Bestimmte Parameter der GPIO wie Pull-Ups können nur mit dem Tool *config-pin* eingestellt werden. Ansonsten bewirken die oben dargestellten Dateioperationen im SysFS aber das selbe wie entsprechende Befehle über das Tool *config-pin*.

Achtung:

Bestimmte binäre I/Os können grundsätzlich nicht ohne Weiteres verwendet werden. Diese sind in den Tabellen in Abschnitt 11.8 rot unterlegt.

Beispiel 2: Analoger Eingang AIN0 an P9_39

```
cd /sys/bus/iio/devices/iio\:device0  
cat in_voltage0_raw
```

Die Ausgabe dieses Befehls ist die Eingangsspannung am analogen Eingang AIN0 in LSB (FSR 1,8 V).

Beispiel 3: PWM Signal an P8_36 und gleichzeitig P9_14 einstellen

Zuerst muss man herausfinden, zu welchem PWM-Hardwarenamen und Kanal dieser Pin gehört. Die Zuordnung des PWM-Chips im SysFS ist leider nicht eindeutig. Hier ist es das Verzeichnis *pwmchip4*.

```
config-pin -i p8.36
```

Output:

```
Pin name: P8_36  
Function if no cape loaded: hdmi  
Function if cape loaded: default gpio gpio_pu gpio_pd gpio_input pwm  
Function information: gpio2_16 default gpio2_16 gpio2_16 gpio2_16 gpio2_16  
ehr pwm1a  
Kernel GPIO id: 80  
PRU GPIO id: 112
```

Konfiguration der Pins als PWM nötig, da diese über den DT als binäre I/O konfiguriert sind.

```
config-pin -a p8.36 pwm  
config-pin -a p9.14 pwm  
cd /sys/class/pwm/pwmchip4
```

```

cd pwm-4\:0
echo 4000 > period
echo 1000 > duty_cycle
echo 1 > enable

```

Die PWM-Periode und -Duty Cycle sind jeweils in μ s angegeben.

Im SysFS gibt es mehrere PWM-Chips mit jeweils zwei Kanälen. Dabei können via *config-pin* für jeden Kanal jeweils zwei Pins ausgewählt werden. Wählt man z.B. PWM-Chip 4 und Kanal 0A aus, so werden über das SysF *sys/class/pwm/pwmchip4/pwm-4\:0* beide Pins P8_31 und P9_14 synchron angesteuert sofern sie vorher mit *config-pin* für PWM konfiguriert wurden.

Hardwarename	PWM Chip des BB	Kanal	Pin des BB
Ehrpwm0a bzw. ehr pwm0b	<i>pwmchip1</i>	0A mit <i>pwm-1\:0</i> bzw. 0B mit <i>pwm-1\:1</i>	P9_31/P9_22 bzw. P9_21/P9_29
Ehrpwm1a bzw. ehr pwm1b	<i>pwmchip4</i>	4A mit <i>pwm-4\:0</i> bzw. 4B mit <i>pwm-4\:1</i>	P9_14/P8_36 bzw. P9_16/P8_34

Für die Schnittstellen I²C, SPI und UART gibt es entsprechende SysFS-Dateien für das Lesen und Schreiben. Jedoch werden zusätzlich Treiberbibliotheken benötigt. Details siehe Buch von D. Molloy, Kapitel 6 [2].

7.4 Die I²C-Busse

Eine sehr gute Anleitung zur Verwendung der I²C-Busse auf LES findet sich in [26].

Folgende Pakete werden für die I²C-Kommunikation benötigt. Mit der folgenden Befehlsfolge werden sie aktualisiert bzw. installiert:

```

apt-get update
apt-get install i2c-tools      # I2C-Toolkit fuer die Kommandozeile
apt-get install python-smbus   # Python-Bibliothek fuer I2C
apt-get install libi2c-dev     # Bibliothek fuer C

```

Mit dem Tool *i2c-tools* kann die I²C Kommunikation zu angeschlossenen Peripheriegeräten (Slaves) wie Sensoren überprüft werden.

Mit dem Befehl *i2cdetect -y -r 2* wird der I²C-Bus 2 nach angeschlossenen Geräten durchsucht.

```

beagle@beaglebone:~$ i2cdetect -y -r 2
 0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  a  b  c  d  e  f
00: -- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
10: - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
20: - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
30: - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
40: - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
50: - - - - - - - - UU - - - - - - - - - - -
60: - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
70: 70 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -

```

Oben ist die Ausgabe dieses Befehls im Terminalfenster dargestellt: Es wurde an der Adresse 0x70 ein Gerät gefunden – in diesem Fall ein SRF02 Ultraschallsensor an den Pins P9_20/_19.

Die Zeichen „UU“ in der Tabelle bedeuten, dass diese Adressen schon im Zugriff eines Treibers sind und daher nicht ausgelesen werden.

Mit dem Befehl *i2cdetect -l* (Achtung nicht „-1“ sondern „-l“) werden die verfügbaren Busse aufgelistet. Beim BB sind dies nach dem Booten i2c-0, i2c-1 und i2c-2.

Achtung:

Auf den ebenfalls angezeigten Bus i2c-0 kann der BB nur intern zugreifen. Der Bus i2c-1 wird nur bei der Version 1 (schwarz) des Grove Capes als Stecker herausgeführt.

Die folgende Tabelle gibt die verschiedenen Bezeichnungen der I²C-Busse sowie deren zugeordnete Pins an.

Grove Cape	SysFS	SDA/SCL Pin	SysFS
I2C1 nur Version 1	i2c-1	P9_18/_17	/dev/i2c-1
I2C2	i2c-2	P9_20/_19	/dev/i2c-2

Weiter können mit *i2c-tools* alle Register eines angeschlossenen Slaves ausgelesen werden. Für den SRF02-Sensor würde dies mit dem Befehl *i2cdump -y 2 0x70* ausgeführt werden, um z.B. die Parametrierung zu kontrollieren. Auch kann man direkt per Kommandozeile mit dem Slave kommunizieren.

Bei den meisten Sensoren kann man die Adresse deren I²C-Schnittstelle ändern, was z.B. nötig wird, wenn man am selben I²C-Bus zwei gleiche Sensoren verwenden möchte. In dem Python Skript *SRF02AddrChange.py* ist dies exemplarisch für den Ultraschallsensor SRF02 gezeigt.

7.5 Die SPI-Schnittstelle

Eine sehr gute Anleitung zur Verwendung der SPI-Schnittstelle auf LES findet sich in [27].

Für das PAT ist nur eine der beiden SPI-Schnittstellen, die SPI0 des BB aktiviert. D0 steht für MISO und D1 für MOSI.

Nur auf dem Grove-Cape Version 1 sind die SPI-Leitungen auf Grove-Steckern herausgeführt. Die SPI-Schnittstelle ist wesentlich lockerer spezifiziert als die I²C-Schnittstelle. Verschiedene Peripheriebauteile benötigen unterschiedliche SPI-Modi und Timings.

7.6 Die UART-Schnittstelle

Im SysFS Dateisystem erscheint die UART4-Schnittstelle als */dev/tty04*. Achtung: Das zweitletzte Zeichen im Pfad ist ein "O" und keine Null!

Die hier zugeordneten Pins P9_11 und 13 werden grüne Grove Cape auf die linke Buchse unter „UART/Digital“ herausgeführt. Für die Pythonprogrammierung wird die Bibliothek *pySerial* verwendet. Die Programmierung in C funktioniert ohne spezielle Schnittstellenbibliothek über das SysFS, siehe [28].

Aus einem Terminalfenster lässt sich die UART-Verbindung mit dem Tool *minicom* unkompliziert testen. Für die UART2-Schnittstelle (*/dev/tty02*) bei 115200 Baud und 8-N-1-Konfiguration wird *minicom* mit *minicom -b 115200 -o -D /dev/tty02* aufgerufen. Für einen Funktionstest eignet sich ein Arduino mit der in Abschnitt 11.16 dargestellten Firmware, die die Zeichen vom BB als Echo an diesen zurück sendet.

7.7 Hardwarespezifisches

Die Analogeingänge haben unter den GPIO eine Sonderstellung und sind streng genommen ja auch gar keine "General" PIO: Sie befinden sich immer an den selben Anschlussbuchsen, die auch nicht durch andere Schnittstellen belegt werden können. Der Grund hierfür ist die nötige Analogelektronik, die nicht einfach über einen Multiplexer weitergeleitet werden kann. Sie sind im Image des PAT automatisch durch den DT konfiguriert.

Achtung:

Die 5 V Spannung an P9_5 bis P9_8 oder über das Grove Cape ist sehr unsauber, d.h. mit vielen Störspannungen überlagert. Soll sie Sensoren versorgen, dann muss diese Spannung mit einem Kondensator geglättet werden. Die 3,3 V Spannung am BB enthält erheblich weniger Störanteile. Verbraucher mit hohem Störpotential wie z.B. die Motortreiber dürfen nicht mit 3,3 V betrieben werden, da der BB dadurch gestört wird. Zudem ist die 5 V Spannungsversorgung wegen des fehlenden Spannungsreglers leistungsfähiger. **Der Maximalstrom für die 5 V Spannung beträgt bei Speisung über VDD_5V 1 A und bei Speisung über den Micro-USB-Anschluss bzw. SYS_5V 500 mA.**

8 Einbinden von Sensoren und Aktoren über Python Skripte

Python ist genial und ersetzt immer mehr MATLAB. Eine gute Übersicht, was man inzwischen alles mit dieser kostenlosen Open Source Programmiersprache machen kann, finden Sie z.B. in [29] oder in [30].

Für das Einbinden von Sensoren und Aktoren (beides Zusammen nennt man auch I/O-Peripherie) in ein LES ist die Programmiersprache Python eigentlich nicht so gut geeignet. Denn als Skriptsprache weist sie eine vergleichbar geringe Ausführungsgeschwindigkeit auf, bei der nur bedingt von Echtzeitfähigkeit gesprochen werden kann. Ideal verwendet man hier C-Programme, zumal damit auch die PRU des BB mit eingebunden werden kann. Siehe hierzu Kapitel 8 in [4].

In [2] wurde für den selben Algorithmus die Programmalaufzeit auf dem BB für verschiedene Programmiersprachen verglichen. Weiter wurde für ein zweites Benchmarking ein einfaches Toggeln des GPIO45 (P8_11) einmal mit C und einmal mit Python programmiert, und anschließend mit einem Oszilloskop die maximal mögliche Togglefrequenz gemessen. Wie in der nachfolgenden Tabelle zu sehen ist, liegt Python bei beiden Vergleichstests weit abgeschlagen.

Programmiersprache	C/C++	Java	Python
Programmalaufzeit (s)	33	39	1063
Frequenz Pin Toggle (kHz)	93	-	5,3

Python wird mit dem Fokus auf die einfache Erlernbarkeit und einfache/klare Syntax von einer gemeinnützigen Organisation entwickelt⁸. Python ist somit sehr viel einfacher als C. Zudem existieren sehr viele Bibliotheken und Beispielprogramme für das Einbinden der Peripherie am BB [6]. Bei fast allen LES wird für das Rapid Prototyping im Sinne von „Rapid“ die Programmiersprache Python eingesetzt. Ein gutes Lehrbuch zu Python ist z.B. [31].

Achtung:

Der wohl auffallendste Unterschied zwischen Python und etablierten Programmiersprachen wie Java oder C ist die Tatsache, dass zusammenhängende Codeblöcke nicht über Klammern sondern über Einrückungen definiert werden. Die Formatierung des Quellcodes bestimmt also dessen Inhalt mit. Dabei ist es wichtig, bei den Einrückungen nicht Tabs und Leerzeichen zu mischen! Verwenden Sie am besten ausschließlich Leerzeichen.

Python spielt auch beim RasPi eine wichtige Rolle. Da dessen Hardware I/O bis auf die fehlenden ADCs recht ähnlich zu denen des BB ist, können RasPi-Pythonskripte einfach auf dem BB portiert werden. Dies betrifft z.B. Beispielprogramme für das Einbinden von Sensoren, siehe [32].

Im PAT wird Python hauptsächlich verwendet, um die I/O-Peripherie vor dem Einsatz zu testen und anschließend Python-ROS-Knoten dafür zu coden. Die interaktive Python-Shell startet man mit dem Befehl `python3` (für Python 3) in einer Konsole. Beendet wird der Python-Interpreter mit `strg + d` oder `strg + c`, wenn ein Skript ausgeführt wird.

Achtung:

Im PAT wird primär Python 3 verwendet. Oft findet man aber Programmbeispiele noch als Python <2.7 Code. In diesem Fall müssen folgende Inkompatibilitäten berücksichtigt werden: Ganzzahlmultiplikation, Verwendung von Umlauten, `print`-Anweisung. Näheres siehe [33].

Für Python 2.7. gilt dies (fast) nicht. Das Coden im PAT betreffend kann Python 2.7 (ROS-Knoten) genau so wie Python 3 verwendet werden.

8.1 Phytonbibliotheken

Beide Pythonversionen sind auf dem BB-Image für das PAT installiert. Darüber hinaus sind die nötigen Python-Bibliotheken vorhanden, um mit der I/O-Peripherie zu kommunizieren.

Die Fa. Adafruit stellt für die Kommunikation über die GPIO-Schnittstellen ADC, PWM, I²C, SPI und UART die universelle Bibliothek `Adafruit_BBIO` für den BB bereit [6]. Statt der `Adafruit_BBIO` können auch die jeweiligen Originalbibliotheken wie `spidev`, `pySerial` oder `python-smbus` (für I²C) verwendet werden.

Achtung:

Zum Anschließen der Peripherie muss unbedingt das Grove Cape aufgesteckt werden, da sonst bei falschem Anschließen der BB zerstört wird.

Es sind jedoch auch dann nur die vierpoligen Grove-Stecker geschützt! Die beiden Buchsenleisten werden vom Grove Cape auf dessen eigene identische Buchsenleisten nur durchkontaktiert.

Der BB muss immer ausgeschaltet sein (nicht ausstecken, sondern über POWER-Taste herunterfahren!) bevor neue Peripherie angeschlossen wird. Den BB erst dann wieder einschalten, wenn Sie die Verdrahtung überprüft wurde.

Außerdem darf an den Anschlüssen des BB keine Spannung anliegen, wenn dieser ausgeschaltet ist.

Zum Öffnen der Beispielprogramme bzw. zum Schreiben eigener Pythonprogramme wird im PAT der Editor `Nano` verwendet. Dieser ist rein textbasiert und am Anfang etwas gewöhnungsbedürftig. Hilfreich ist hierbei ein Cheat Sheet, siehe Abschnitt 11.4.

Um eine Quellcodedatei `myCode.py` zu erstellen, wird in der Linuxkonsole der Befehl `nano myCode.py`

⁸ Der Name „Python“ wurde der Komikergruppe „Monty Python“ entlehnt – im Sinne der fehlenden Ehrfurcht gegenüber der Programmiersprache C.

eingegeben, der den Texteditor *Nano* öffnet. Darin gibt man den Quellcode ein.

Anschließend wird die fertige Skriptdatei mit dem Befehl *python3 myCode.py* im Interpreter ausgeführt. Wenn das Skript eine Endlos-Whileschleife beinhaltet, wird der Interpreter mit *Strg + c* beendet.

Die erste Zeile im Python-Quellcode gibt das Verzeichnis des Interpreters an, man nennt sie „Shebang“. Wenn man vorher mit dem Befehl *chmod +x myCode.py* der Quelldatei Ausführungsrechte gegeben hat, dann kann man auch nur mit dem Befehl *./myCode.py* das Programm starten. Die zweite Zeile sorgt dafür, dass deutsche Umlaute zu keiner Fehlermeldung führen.

Alle hier vorgestellten Beispielprogramme sind für Python 3 geschrieben laufen auch unter Python 2.7 als Codebestandteil der ROS-Knoten.

Folgende Beispielprogramme befinden sich auf dem Image des PAT bzw. im GitHub Repository:

Programmname	Funktion	Bemerkung
<i>myBlink.py</i>	Toggeln des GPIO 117 (P9_25)	via Bibliothek <i>Adafruit_BBIO</i>
<i>myBlink_SysFS.py</i>	Toggeln des GPIO 117 (P9_25)	via SysFS
<i>myBlink_SysFS_OS.py</i>	Toggeln des GPIO 117 (P9_25)	via SysFS, byteweises Schreiben
<i>myGPIOread.py</i>	Auslesen GPIO 115 (P9_27)	via SysFS
<i>myADC.py</i>	Auslesen des AIN0 (P9_39)	via Bibliothek <i>Adafruit_BBIO</i>
<i>myADC_SysFS.py</i>	Auslesen des AIN0 (P9_39)	via SysFS
<i>mySRF02_smbus.py</i>	Auslesen Abstandswert in cm Ultraschallsensor via I ² C-Bus 2	via Bibliothek <i>smbus</i> , Ändern I ² C-Adresse mit <i>SRF04AddrChange.py</i>
<i>myPWM.py</i>	PWM-Signal auf GPIO 50 (P9_14)	via Bibliothek <i>Adafruit_BBIO</i> , für Modellbauservo gedacht
<i>myMot.py</i>	PWM-Signal auf GPIO 50 (P9_14), GPIO 51 (P9_16), Richtungssignal via GPIO 117 (P9_25), GPIO 115 (P9_27)	via Bibliothek <i>Adafruit_BBIO</i> , für beide DC-Motoren des RoboToGo gedacht
<i>myPWM_SysFS.py</i>	PWM-Signal auf GPIO 50 (P9_14)	via SysFS, für Modellbauservo gedacht
<i>myUART.py</i>	Serielle Kommunikation mit Arduino (Firmware <i>UARTComm_BB_Ardu.ino</i>) über UART2-Schnittstelle (RX: P9_22, TX: P9_21)	via Bibliothek <i>pySerial</i>
<i>myAmrSens.py</i>	Auslesen des AMR-Sensors QMC5883L	via Bibliothek <i>smbus</i>

8.2 Beispielprogramm *myBlink.py*: LED blinken lassen.

Wie auch bei der Arduinoprogrammierung fängt man beim Physical Computing erst einmal ganz klein an: Man lässt eine LED blinken – d.h. ein GPIO wird ein- und ausgeschaltet.

Der Ausgang P9_25 (GPIO 117) wird mit einer Frequenz von 1 Hz ein- und ausgeschaltet.

```
# !/usr/bin/python3
# -*- coding: utf-8 -*-

import Adafruit_BBIO.GPIO as GPIO
import time
import sys
pin = "P9_25"
GPIO.setup(pin, GPIO.OUT)
print("Pin enabled...")

try:
    while True:
        GPIO.output(pin, GPIO.HIGH)
        time.sleep(0.5)
        GPIO.output(pin, GPIO.LOW)
        time.sleep(0.5)
except KeyboardInterrupt:
    print("")
```

```

GPIO.output(pin, GPIO.LOW)
print("...Pin disabled.")
print("Byebye...")

```

Im Quellcode oben wurde die Adafruit_BBIO-Bibliothek verwendet. Die gleiche Programmfunction kann aber auch über direktes Schreiben auf das SysFS erreicht werden, siehe Quellcodes *myBlink_SysFS_0S.py* oder *myBlink_SysFS.py*.

8.3 Beispielprogramm *myGPIOread.py*: GPIO auslesen

Hier wird ein direktes Schreiben auf das SysFS verwendet um den Status des GPIO-Pins P9_27 auszulesen.

```

import time
import sys
setup = open('/sys/class/gpio/gpio115/direction', 'w')
setup.write('in')
setup.close()
time.sleep(1)
print('GPIO 115 als Eingang gesetzt')
gpio = open('/sys/class/gpio/gpio115/value', 'r')

try:
    while True:
        value= gpio.read().strip()
        print('GPIO-Zustand: {}'.format(value))
        gpio.seek(0)
        time.sleep(1)
except KeyboardInterrupt:
    print("")
    print("Byebye...")
    gpio.close()

```

8.4 Beispielprogramm *myADC.py*: Analogspannung auslesen (ADC)

An dem Steckplatz „Analog Input“ des Grove Capes wird ein Potentiometer angeschlossen. Dieses wird mit VCC 3,3 V und GND spannungsversorgt. Sein Mittenabgriff liegt auf Eingang AIN0 (P9_39).

Es wird wieder die Bibliothek *Adafruit_BBIO* verwendet. Das Skript *myADC.py* liest die Spannung am BB Pin P9_39 jede Sekunde aus, bis das Programm mit *Strg + c* aus der Linuxkonsole heraus beendet wird.

```

import sys
import Adafruit_BBIO.ADC as ADC
import time
ADC.setup()

try:
    while True:
        #read returns values 0-1.0
        valueNorm = ADC.read("P9_39")
        #read_raw returns non-normalized value
        valueRaw = ADC.read_raw("P9_39")
        time.sleep(1)
        print("Normierter Wert: {}".format(valueNorm))
        print("Rohwert: {}".format(valueRaw))
except KeyboardInterrupt:
    print("")
    print("Byebye...")

```

Der vom AD-Wandler gemessene Wert wird in LSB (12 Bit bezogen auf $U_{Ref} = 1,8 \text{ V}$) bzw. auf 1 normiert ausgegeben. Am Grove Cape wird unabhängig von Stellung des VCC-Schalters die Eingangsspannung am Grove Stecker um den Faktor 1,8/5 reduziert. Somit entsprechen 3,3 V ca. 2700 LSB.

Auch hier gibt es eine Version *myADC_SysFS.py* die die ADC-Werte direkt über das SysFS ausliest.

8.5 Beispielprogramm mySRF02_smbus.py: Sensordaten via I²C von einem SRF02-Ultraschallsensor „zu Fuß“ auslesen.

Dieses Skript `mySRF02_smbus.py` verwendet für die I²C Kommunikation nicht die Bibliothek `Adafruit_BBIO`, denn unter Python 3 funktioniert diese Bibliothek für die I²C-Kommunikation nicht fehlerfrei. Stattdessen wird die Pythonbibliothek `smbus` verwendet. Der Ultraschallsensor ist am I²C-Bus 2 angeschlossen (P9_19 SCL, P9_20 SDA).

```
import sys
import smbus
import time
i2c = smbus.SMBus(2)
print('i2c-bus opened...')

try:
    while True:
        i2c.write_byte_data(0x70, 0, 0x51)
        time.sleep(0.2)
        print(i2c.read_word_data(0x70, 2) / 255)
        time.sleep(1)
except KeyboardInterrupt:
    print('')
    i2c.close()
    print('...i2c-bus closed.')
    print('Byebye...')
```

Tipp:

Falls die Kommunikation nicht funktioniert, dann mit dem Tool `i2c-tooI` überprüfen, ob und unter welcher Adresse und Busnummer der Sensor über den I²C Bus erreichbar ist. Mit dem Pythonskript `SRF02AddrChange.py` kann die I²C-Adresse des Sensors geändert werden. *Die neue Adresse muss dabei unbedingt innerhalb des gültigen Adressbereichs liegen ansonsten ist der Sensor anschließend nicht mehr zugänglich = Elektroschrott.*

Machen Sie sich auch mit den Messeigenschaften des Ultraschallsensors vertraut: Dieser liefert z.B. Fehlmessungen bei Reichweiten ca. <100 mm oder beim Antasten glatter ebener Flächen, die den Ultraschall spiegelnd reflektieren.

8.6 Beispielprogramm myPWM.py: PWM-Signal erzeugen

Für das Erzeugen eines PWM-Signals kann man entweder die Bibliothek `Adafruit_BBIO` verwenden oder direkt auf das SysFS schreiben. Im nachfolgendem Codebeispiel wurde die Bibliothek verwendet. Das Codebeispiel `myPWM_SysFS.py` verwendet keine Bibliothek.

```
import Adafruit_BBIO.PWM as PWM
import sys
import time

pin = "P9_14"
FREQ = 50
MINDUTYC = 0.03
MAXDUTYC = 0.12
POL = 0
dutyC = MINDUTYC
PWM.start(pin, ((MINDUTYC+MAXDUTYC)/2*100), FREQ, 0)

try:
    while True:
        PWM.set_duty_cycle(pin, dutyC*100)
        time.sleep(1)
        dutyC = dutyC + 0.01
        if (dutyC > MAXDUTYC):
            dutyC = MINDUTYC
#Falls Strg+c gedrückt wird
except KeyboardInterrupt:
    PWM.cleanup()
    print("")
    print("Byebye...")
```

8.7 Beispielprogramm myMot.py: Ansteuerung von DC-Motoren über einen H-Bückentreiber

Dieses Programm ist für den RoboToGo-Roboter gedacht. Über dessen Motortreiberplatine TB6612 werden die beiden DC-Motoren getrennt jeweils über ein PWM-Signal mit 250 kHz angesteuert. Zwei weitere GPIOs als Schaltausgänge steuern die (gemeinsame) Drehrichtung der Motoren. Der Motortreiber muss über VDD_5V also über die Power Bank und nicht via USB mit Strom versorgt werden, da hier anders als beispielsweise bei einem kleinen Modellbauservo höhere Ströme fließen. Zur Entkopplung der stark schwankenden Last durch den Motortreiber sollte an dessen Spannungseingang ein Keramikkondensator mit ca. 1 mF geschaltet werden.

Tipp:

Falls die Ansteuerung der Motoren nicht funktioniert, dann überprüfen ob beim TB6612 der Stand By Eingang auf Low liegt (nur manche Break Out Platinen haben einen Pull Down) und ob die PWM-Frequenz für die gewählte Break Out Platine nicht zu hoch ist.

```
import Adafruit_BBIO.PWM as PWM
import Adafruit_BBIO.GPIO as GPIO
import sys
import time

pin_motL = "P9_14" # GPIO 50 PWMA linker Motor
pin_motR = "P9_16" # GPIO 51 PWMB rechter Motor
pin_in1 = "P9_25" # GPIO 117
pin_in2 = "P9_27" # GPIO 115
FREQ = 250000
DUTYC = 0.6

PWM.start(pin_motL, (DUTYC*100), FREQ, 0)
PWM.start(pin_motR, (DUTYC*100), FREQ, 0)
GPIO.setup(pin_in1, GPIO.OUT)
GPIO.setup(pin_in2, GPIO.OUT)

try:
    while True:
        GPIO.output(pin_in1, GPIO.HIGH)
        GPIO.output(pin_in2, GPIO.LOW)
        PWM.set_duty_cycle(pin_motL, DUTYC*100)
        PWM.set_duty_cycle(pin_motR, DUTYC*100)
        time.sleep(2)
        PWM.set_duty_cycle(pin_motL, 0)
        PWM.set_duty_cycle(pin_motR, 0)
        time.sleep(0.5)
        GPIO.output(pin_in1, GPIO.LOW)
        GPIO.output(pin_in2, GPIO.HIGH)
        PWM.set_duty_cycle(pin_motL, DUTYC*100)
        PWM.set_duty_cycle(pin_motR, DUTYC*100)
        time.sleep(2)
        PWM.set_duty_cycle(pin_motL, 0)
        PWM.set_duty_cycle(pin_motR, 0)
        time.sleep(0.5)
except KeyboardInterrupt:
    PWM.cleanup()
```

8.8 Beispielprogramm myUART.py: UART-Kommunikation (mit Arduino)

Als Kommunikationspartner dient hierfür ein Arduino mit der in Abschnitt 11.16 dargestellten Firmware *UARTComm_BB_Ardu.ino*.

Konkret in diesem Beispiel verwendet der BB die UART2-Schnittstelle, welche im Pythonprogramm an Anfang mit dem Tool *config-pin* und den Befehlen *config-pin -a p9.21 uart* bzw. *config-pin -a p9.22 uart* konfiguriert wird.

```
from subprocess import call
import serial
import sys
from time import sleep

command = "config-pin -a p9.21 uart"
```

```

call(command, shell= True) # execute command in Bash Shell
command = "config-pin -a p9.22 uart"
call(command, shell= True)

ziffer = 0
print('Vorher Arduino Reset drücken - Abbruch mit strg + c')
print('...zwei Sekunden warten...')
sleep(2)

try:
    port = serial.Serial(port='/dev/tty02', baudrate = 115200, timeout = 1)
    sleep(1)
    print('Arduino sagt: ', port.readline().decode("utf-8"))
    sleep(0.5)
    port.readline()
    port.flushInput()
    print('Messungen werden vom Arduino angefordert...')
    while True:
        port.write(str(ziffer).encode())
        result = port.readline()
        print('Arduino sagt: {}'.format(str(result)))
        sleep(1)
        ziffer = (ziffer +1)%10
except KeyboardInterrupt:
    print()
    print('Programm mit strg + c abgebrochen bzw. Laufzeitfehler')
finally:
    port.close()
    print('Schnittstelle geschlossen')

```

9 Einbinden von Sensoren und Aktoren über C/C++ Programme

Python ist eine sehr gute Programmiersprache, um im Rapid Prototyping eine Idee zu testen. Hat sich die Idee bewährt, dann wird der Pythonquellcode oft in C umgeschrieben. Mit C und seiner objektorientierten Variante C++ können Programme systemnah geschrieben werden. Die Programme haben bei C einen direkten Zugriff auf die Hardware, die Firmware, den Kernel und auf das Betriebssystem.

Anders als Python wird ein C-Programm vom Compiler in Maschinensprache übersetzt. Solche "nativen" Programme haben eine um Größenordnungen höhere Ausführungsgeschwindigkeit als Pythonskripte.

Gerade auf dem BB mit nur einem Prozessorkern bei 1 GHz Taktfrequenz und mit nur 1 GB RAM Arbeitsspeicher ist dies ein wichtigeres Thema als bei einem aktuellen Smartphone mit 8 x 2 GHz und 4 GB.

Auf jedem Linuxsystem ist ein C-Compiler (*gcc*) präsent. Im PAT wird *gcc* für C-Code verwendet. Für C++-Code wird der ebenfalls schon vorhandene Compiler *g++* verwendet.

Einen Quellcode *meinProgramm.c* wird mit *gcc meinProgramm.c -o meinProgramm* kompiliert. Die Option *-o* bewirkt, dass das ausführbare Programm den Namen *meinProgramm* erhält. Ohne diese Option erhält es den Namen *a.out*.

Aufgerufen wird das Programm dann mit *./meinProgramm*.

Mit dem Compiler *g++* wird in gleicher Weise ein ausführbares Programm erzeugt.

Folgende Beispielprogramme befinden sich auf dem Image des PAT bzw. im GitHub Repository:

Programmname C	Funktion	Bemerkung
<i>myBlink.c</i>	Toggeln des GPIO 117 (P9_25)	via SysFS, byteweises Schreiben
<i>myGPIOread.c</i>	Auslesen GPIO 115 (P9_27)	via SysFS, byteweises Lesen
<i>myGPIOset.c</i>	Setzen GPIO 117 (P9_25)	via SysFS, blockweises Schreiben
<i>myADC.c, myADC.cpp</i>	Auslesen des AIN0 (P9_39)	via SysFS, blockweises Lesen
<i>mySRF02.c</i>	Auslesen Abstandswert in cm Ultraschallsensor via I ² C-Bus 2	Ohne SMBUS
<i>myPWM.c</i>	PWM-Signal auf GPIO 50 (P9_14)	via SysFS, blockweises Schreiben, für Modellbauservo gedacht
<i>myUART.c</i>	Serielle Kommunikation mit Arduino (Firmware <i>UARTComm_BB_Ardु.ino</i>) über UART2-Schnittstelle (RX: P9_22, TX: P9_21)	via Bibliothek <i>termios</i>

10 Mit ROS-Knoten arbeiten und selbst ROS-Knoten erstellen

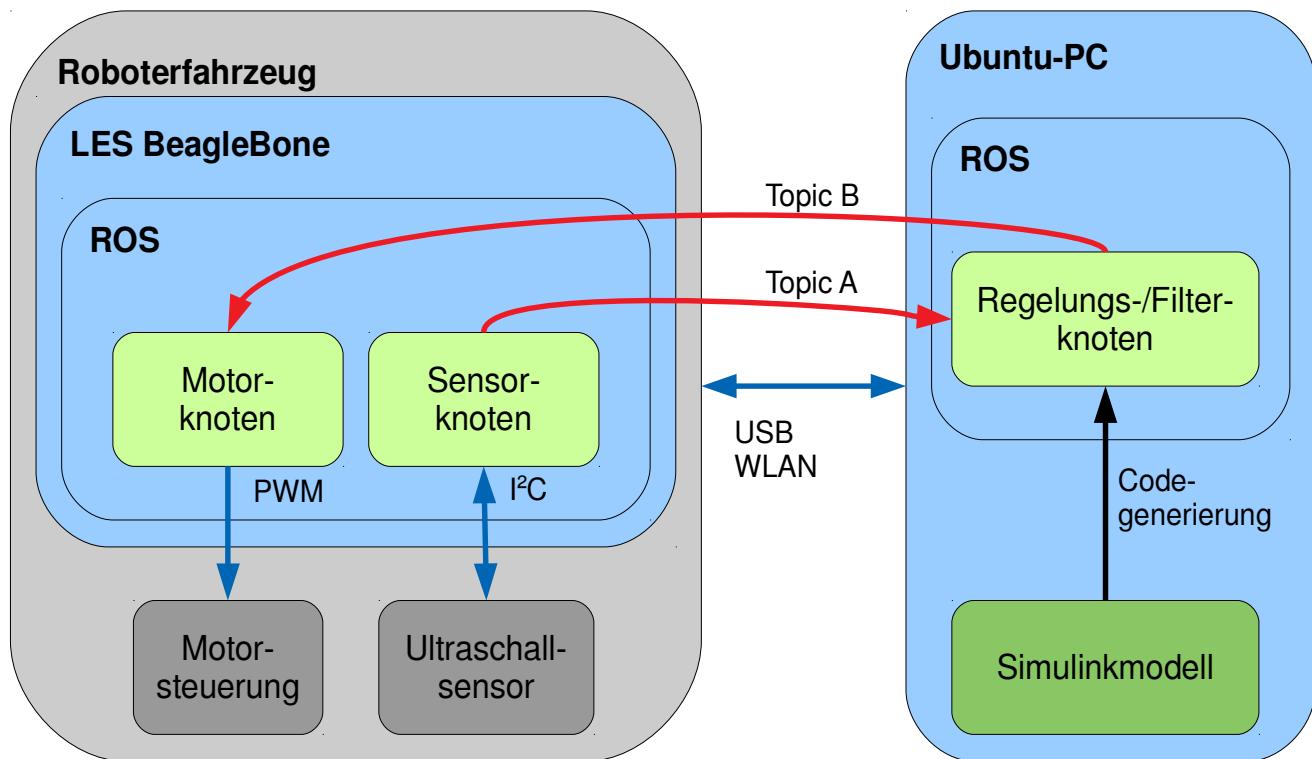
Die vorangegangenen Abschnitte behandelten die Computerplattformen PC und BB, die beide mit einem Ubuntu-Linuxbetriebssystem inklusive der Middleware ROS ausgestattet sind.

Dieses Kapitel behandelt anhand von Beispielen den Umgang mit ROS zuerst jeweils separat auf nur einer dieser beiden Plattformen. Für die PC-Plattform wird zusätzlich dargestellt, wie dort über ein Simulinkmodell ein ROS-Knoten erstellt wird. In den letzten Abschnitten wird gezeigt, wie ROS-Knoten verteilt auf den beiden unterschiedlichen Plattformen kommunizieren und damit softwareseitig ein mechatronisches System abbilden.

Dies ist letztendlich das Ziel des PAT: Das Roboterfahrzeug als modularisiertes mechatronisches System besitzt die Komponenten Sensordatenerfassung, Motorsteuerung und Kalman-Filter / Regelung. Jeder dieser Komponenten (=Module) ist ein ROS-Knoten (=Modul) also ein Prozess zugeordnet.

Dabei werden die Knoten Sensordatenerfassung und Motorsteuerung auf dem BB ausgeführt. Der Knoten Kalman-Filter / Regelung wird mit Simulink auf dem PC erstellt und dort auch ausgeführt.

Wie in der Grafik dargestellt liefert der Sensorknoten Abstandsmesswerte (Topic A) an den Filter-/Regelungsknoten. Dieser wiederum liefert Solldrehzahlen der Räder (Topic B) an die Motorsteuerung.



10.1 ROS und ROS-Knoten ausschließlich auf dem PC

Um sich mit ROS (und Linux) vertraut zu machen, ist es am einfachsten mit dem PC zu beginnen. Denn die ros.org Internetseiten liefern ein sehr gutes Tutorial für den Einstieg [16].

Das Lernziel hierbei ist es, einen Publisher und eine Subscriber-Knoten selbst coden und ausführen zu können. Es wird empfohlen dies in der Programmiersprache Python zu machen. Liegen ausreichende Programmierkenntnisse in C vor, dann können die Knoten auch in dieser Sprache geschrieben werden. Das ros.org Tutorial behandelt sowohl Python als auch C/C++.

Für die Einarbeitung in ROS sind folgende Abschnitte des ros.org Tutorials empfehlenswert:

1. Navigating the ROS Filesystem (catkin)
2. Creating a ROS Package (catkin)
3. Building a ROS Package (catkin)

4. Understanding ROS Nodes
5. Understanding ROS Topics
6. Understanding ROS Services and Parameters
7. Writing a Simple Publisher and Subscriber (Python) (catkin)
8. Examining the Simple Publisher and Subscriber

10.2 ROS und ROS-Knoten ausschließlich auf dem BeagleBone

Auf dem BB-Image des PAT sind die nachfolgenden Schritte schon ausgeführt worden. Hier kann direkt auf das ROS-Package `srp-init` zugegriffen werden.

Es werden vier Terminalfenster auf dem PC benötigt: Dazu mit `strg + alt + t` den Terminalmultiplexer Terminator öffnen und anschließend mit `strg + shift + o` bzw. `strg + shift + e` das Fenster horizontal bzw. vertikal teilen. In jedem der vier Terminalfenster `./bbcon_usb.sh` ausführen und damit eine SSH-Verbindung via USB mit dem BB herstellen.

Bei einem frischen ROS-Ubuntu Image z.B. von elinux.org müssen zuerst die Umgebungsvariablen geladen werden:

```
source /opt/ros/melodic/setup.bash
```

Dann muss ein Workspace-Verzeichnis mit Namen `catkin` sowie ein Verzeichnis `src` darin angelegt werden.

```
mkdir -p ~/catkin_ws/src
cd ~/catkin_ws/
```

Um mit Python 3 anschließend den Workspace zu initialisieren muss das Pythonmodul `catkin_pkg` installiert werden:

```
pip3 install catkin_pkg
```

Bei dem nun folgenden Befehl ist es wichtig, dass er in einem bis auf `src` leeren neu erstellten Verzeichnis `catkin_ws` initial ausgeführt wird:

```
catkin_make -DPYTHON_EXECUTABLE=/usr/bin/python3
```

Damit wird Python 3 als Pythonversion für ROS festgelegt.

Im nächsten Schritt wird das ROS-Package `srp_init` erstellt:

```
beagle@beaglebone:~$ cd catkin_ws/
beagle@beaglebone:~/catkin_ws/src$ catkin_create_pkg srp_init std_msgs rospy roscpp
Created file srp_init/package.xml
Created file srp_init/CMakeLists.txt
Created folder srp_init/include/srp_init
Created folder srp_init/src
Successfully created files in /home/beagle/catkin_ws/src/srp_init. Please adjust the
values in package.xml.
```

In das Verzeichnis `src/srp_init` wird nun die Datei `package.xml` entsprechend den Anweisungen des Tutorials aus Abschnitt 10.2 editiert. Dann wird im selben Verzeichnis ein Verzeichnis `scripts` angelegt, in das die Beispielpythonskripte des PAT kopiert werden. Anschließend wird im Verzeichnis `catkin_ws` der Befehl `catkin_make` ausgeführt.

Abschließend wird in jedem Terminalfenster wie gewohnt `source devel/setup.bash` ausgeführt bzw. dieser in die Datei `~/.bashrc` eingefügt damit er beim Öffnen eines neuen Terminalfensters automatisch ausgeführt wird.

Aus dem Package `srp_init` können nun die verschiedenen Knoten gestartet werden:

Knotennamen	Publisher von	Subscriber von
<code>adc_talker.py</code>	ADC-Wert Pin 9_39 in LSB 12 Bit <code>/adc_val UInt16</code>	
<code>gpio_listener.py</code>		<code>/range_val UInt16</code> , setzt Pin P9_25 auf High falls Wert < 30
<code>srf02_talker.py</code>	Abstandsmesswert Ultraschallsensor SRF02 an I ² C Bus 2 in cm <code>/range_val UInt16</code>	
<code>gpio_talker.py</code>	Eingangswert GPIO Pin P9_27 <code>/gpio_val UInt8</code>	
<code>servo_listener.py</code>		<code>/range_val UInt16</code> Im Bereich 0..100 cm Stellung Servoposition via P9_14 proportional zum Abstandsmesswert
<code>motor_listener.py</code>		<code>/range_val UInt16</code> Im Bereich <30 cm wird der Duty Cycle des PWM-Signals um 20 % reduziert.
<code>simulink_listener_talker.py</code>	<code>/volt_thresh</code>	<code>/adc_val_mv</code>

10.2.1 Beispiel ROS-Netzwerk in getrennen Terminalfenstern

Zunächst wird gezeigt, wie der ROS-Master und jeder Knoten einzeln in einem jeweils eigenem Terminalfenster gestartet wird:

Knoten `srf02_talker` (Ultraschallsensor) ausführen und dessen Topic `/range_val` ausgeben. Danach zweiten Knoten `gpio_listener` (GPIO steuern) ausführen, damit LED an P9_25 aufleuchtet falls Abstand < 30 cm ist.

Terminal 1: `roscore # ROS-Master starten`

Terminal 2: `rosrun srp_init srf02_talker.py #Knoten starten`

Terminal 3: `rostopic list #Vorhandene Topics auflisten`
`rostopic echo /range_val #Topic /range_val ausgeben`
`strg + c #Topicausgabe stoppen`
`rosrun gpio_listener.py #Knoten starten`

Zum Beenden in jedem Terminalfenster `strg + c` eingeben.

10.2.2 Beispiel ROS-Netzwerk mit `roslaunch` in einem gemeinsamen Terminalfenster via Launchdatei

Besteht das ROS-Netzwerk aus vielen Knoten, dann wird es schnell unübersichtlich, wenn wie im vorangegangenen Abschnitt für jeden Knoten ein gesondertes Terminalfenster geöffnet wird. Mit dem ROS-Tool `roslaunch` können alle benötigte Knoten und auch der ROS-Master mit *einem* Befehl in einem *gemeinsamen* Terminalfenster gestartet werden.

Dazu wird im Paketordner `srp_init` ein neuer Ordner mit dem Namen `Launch` angelegt. Darin wird eine sogenannte Launchdatei – hier die Datei `srp_srf02_gpio.launch` – mit folgendem Inhalt erstellt:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<launch>
  <node name="mein_srf02_talker" pkg="srp_init" type="srf02_talker.py" />
  <node name="mein_gpio_listener" pkg="srp_init" type="gpio_listener.py" />
</launch>
```

Wird diese Launchdatei mit dem Befehl `roslaunch srp_init srp_srf02_gpio.launch` gestartet, dann werden die drei getrennten Ausführungen des vorherigen Abschnitts (`roscore` und zweimal `rosrun`) in einem Rutsch und im selben Terminalfenster ausgeführt. Das damit erzeugte ROS-Netzwerk ist dasselbe wie im

Abschnitt zuvor.

Lediglich haben die beiden Knoten nun noch extra Namen erhalten (*mein_...*). Für den Fall, dass in einer Launchdatei ein Knoten mehrmals benötigt wird, kann so zwischen den erzeugten Knoten unterschieden werden.

Tipp:

Falls die Tab-Vervollständigung nicht funktioniert, sind vielleicht die ROS-Umgebungsvariablen nicht gesetzt. Dies lässt sich mit dem Befehl `source ~/catkin_ws/devel/setup.bash` beheben.

10.3 ROS-Knoten auf PC und BeagleBone, die miteinander kommunizieren

In diesem Beispiel wird der ROS-Master nicht auf dem BB sondern auf dem PC gestartet, damit dort auf die Messwerte (Topic `/range_val`) des Ultraschallsensors (Knoten `srf04_talker.py`) zugegriffen werden kann.

BB und PC befinden sich im selben WLAN und kommunizieren darüber. Dafür muss dem BB die IP-Adresse des Masters mitgeteilt werden. Dazu muss auf dem BB die Datei `~/.bashrc` entsprechend editiert werden. Der für ROS relevante Inhalt am Ende dieser Datei ist nachfolgend wiedergegeben:

```
# Set ROS Melodic
source /opt/ros/melodic/setup.bash
source ~/catkin_ws/devel/setup.bash
export EDITOR='nano -w'

export ROS_MASTER_URI=http://192.168.178.62:113119
export ROS_HOSTNAME=192.168.178.7110
```

Der PC hat in diesem Fall im WLAN die IP-Adresse `192.168.178.62`, der BB `192.168.178.71`. Damit kennt das ROS auf dem BB nun den Master.

Da der ROS-Master auf dem PC läuft müssen dort an der Datei `.bashrc` keine Änderungen vorgenommen werden.

Auf dem PC Terminator mit vier Terminalfenster ausführen. Auf zwei Fenstern mit dem Bash-Skript `./bbcon_wlan.sh` eine SSH-Verbindung mit dem BB via WLAN aufbauen.

Beispiel ROS-Netzwerk:

Knoten `srf04_talker` (Ultraschallsensor) auf dem BB ausführen und dessen Topic `/range_val` auf dem PC ausgeben.

```
Terminal 1 PC:      roscore      #ROS-Master starten auf PC
Terminal 1 BB:      rosrun srf04_talker.py #Knoten starten auf BB
Terminal 2 PC:      rostopic list  #vorhandene Topics auflisten
                    rostopic echo /range_val #Topic /range_val ausgeben
```

Zum Beenden in jedem Terminalfenster `strg + c` eingeben.

10.4 Simulink ROS-Knoten auf PC erzeugen, die mit ROS-Knoten auf BeagleBone kommunizieren

Dieses Beispiel beinhaltet eigentlich das gleiche Vorgehen wie im Abschnitt 10.1, wo mehrere ROS-Knoten auf dem PC gecode und anschließend zusätzlich zum ROS-Master auf dem PC ausgeführt wurden.

Nun wird jedoch der Knoten nicht durch ein Python oder C-Programm auf dem PC erzeugt, sondern mit einem PC-Simulinkmodell. Im Hintergrund erzeugt das Simulinkmodell C-Code und aus diesem C-Code wird eine ROS-Knoten erzeugt und ausgeführt. Insofern ist das Vorgehen fast das gleiche wie in im Abschnitt 10.1, wenn dort der Knoten nicht mit Python sondern C erzeugt worden wäre.

Der Knoten wird also mit Simulink erstellt und ausgeführt. Ein solcher Simulink-ROS-Knoten wird im PAT später für den Kalman-Filter bzw. für die Regelung verwendet.

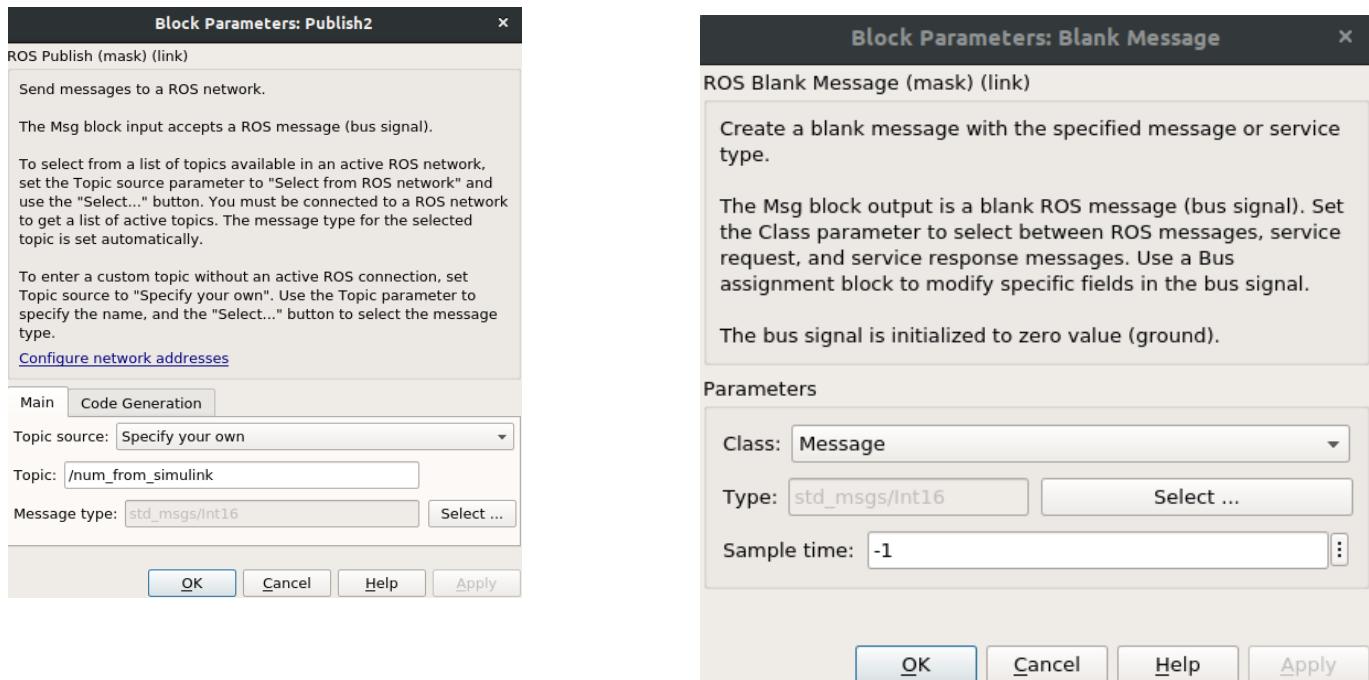
Da der ROS-Master wieder auf dem PC läuft müssen an der Datei `.bashrc` des BB die gleichen Änderungen wie im vorangegangenen Abschnitt vorgenommen werden. An der Datei `.bashrc` des PC wird wie im vorherigen Beispiel keine Änderung vorgenommen.

⁹ Falls Kommunikation via USB: IP-Adresse 192.168.6.1

¹⁰ Falls Kommunikation via USB: IP-Adresse 192.168.6.2

10.4.1 PC-Simulinkknoten als reiner ROS Publisher

Das Simulinkmodell *count_pub.s1x* beinhaltet einen trivialen Publisher-Knoten, der ein Topic mit Namen */num_from_simulink* mit Datentyp *Int16* ausgibt, welches bei jedem Sample um den Wert 1 erhöht wird bis 255 (8 Bit) erreicht sind und dann erneut von 0 weiter zählt.



In dem Block „ROS Blank Message“ wird von den ROS-Standardmessages der Nachrichtentyp *std_msgs/Int16* ausgewählt.

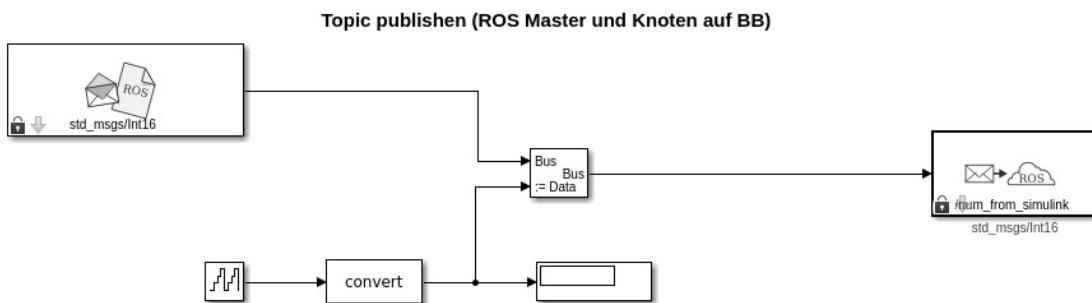
Im Block „ROS Publish“ wird dem Topic der Namen */num_from_simulink* gegeben und der Nachrichtentyp *std_msgs/Int16* zugewiesen.

Unter dem Tab *Simulation* in Simulink wird das Menü über *PREPARE* aufgeklappt:

Dort befindet sich der Menüpunkt *Model Settings*. Hier wird unter *Solver* und *Fixed-Step size (fundamental sample time)* der Wert 0.1 eingegeben. D.h. dieser Knoten veröffentlicht (und inkrementiert) 10 mal pro Sekunde sein Topic.

Im Selben Menü befindet sich auch der Menüpunkt *ROS Network*. Da der ROS-Master und der ROS-Knoten beide auf dem PC laufen, muss hier keine IP-Adresse sondern *Default* eingegeben werden.

Nun wird mit *strg + alt + t* auf dem PC ein Terminal mit zwei Terminalfenstern geöffnet, darin zum Verzeichnis *catkin_ws* gewechselt und der Befehl *source devel/setup.bash* in jedem Terminalfenster ausgeführt¹¹.



Anschließend wird im Terminalfenster mit *roscore* der ROS-Master gestartet. Im Menüpunkt *ROS Network* von vorhin kann über den Button *Test* abgeprüft werden, ob der eben gestartete ROS-Master von Simulink

11 Das Laden der Umgebungsvariablen kann in die Datei *~/.bashrc* in Form des Befehls *source ~/catkin_ws/devel/setup.bash* geschrieben werden. Dann wird dieser Befehl und damit das Laden automatisch beim Öffnen eines neuen Terminalfensters (= Bash Shell) ausgeführt.

aus erreichbar ist.

Im Tab *Simulation* kann nun durch Klicken des runden grünen Icons *Run* der ROS-Knoten des Simulinkmodells *count_pub* gestartet werden.

Im noch nicht belegten Terminalfenster wird nun mit *rosnode list* nach dem eben gestarteten Simulinkknoten gesucht:

```
rosnode list  
/count_pub_xxxxx  
/rosout
```

Dabei ist */count_pub1_xxxxx* der Name des ROS-Knotens und */count_pub1* sein Typ. Die fünfstellige Zahl *xxxxx* ist bei jedem Starten des Knotens anders, damit bei mehreren Knoten dieses Typs die einzelnen Knoten unterschieden werden können.

Mit dem Befehl *rostopic list* werden die verfügbaren Topics aufgelistet:

```
rostopic list  
/num_from_simulink  
/rosout  
/rosout_agg
```

Mit dem Befehl *rostopic info* wird der Nachrichtentyp und der Namen des Publisher-Knotens angezeigt

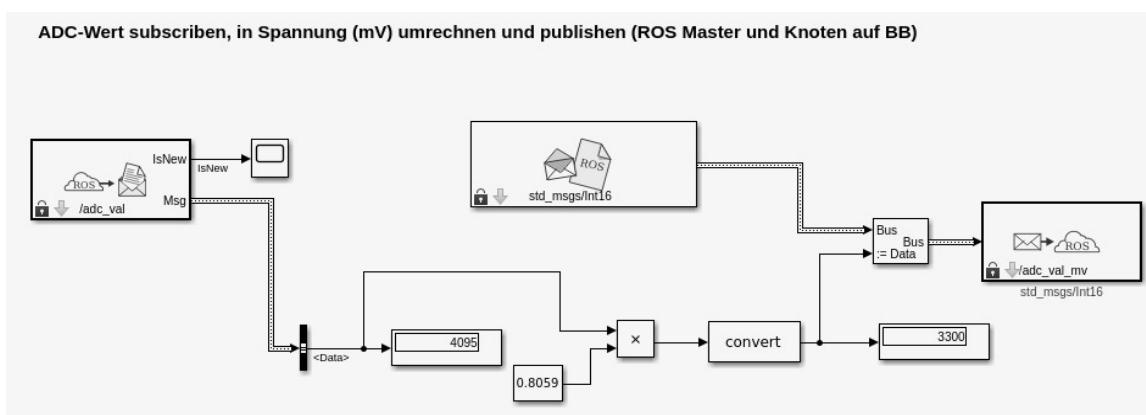
```
rostopic info /num_from_simulink  
Type: std_msgs/Int16  
Publishers:  
* /count_pub_81473 (http://192.168.178.62:37851/)  
Subscribers: None
```

Und mit *rostopic echo /num_from_simulink* wird der Wert des Topics angezeigt:

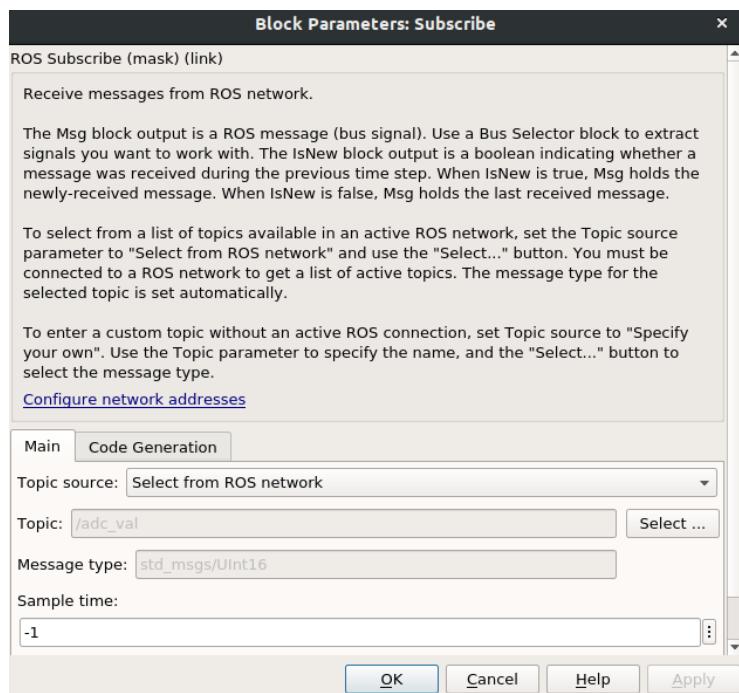
```
rostopic echo /num_from_simulink  
data: 63  
---  
data: 64  
---  
data: 65  
---  
data: 66  
---  
data: 67
```

10.4.2 PC-Simulinkknoten als Publisher-/Subscriber der mit einem Publisher des BB kommuniziert

Der ROS Master läuft auf dem BB. Anders als in den vorangegangenen Beispielen kann hier auch ein Windows-PC verwendet werden, da der ROS-Master auf dem BB ausgeführt wird.



Im Beispiel-Simulinkmodell *adccconv_subpub.s1x* wird vom PC-Simulinkknoten der Topic */adc_val* des BB-Knotens *adc_talker* abonniert. Der UInt16-Wert von */adc_val* (ADC-Output als 12-Bit LSB-Wert 0...4095) wird vom Simulinkknoten in Millivolt bezogen auf $V_{\text{Ref}} = 3,3 \text{ V}$ umgerechnet (also mit $3300 \text{ mV}/4095 = 0,8059$ multipliziert, VCC auf 3,3 V) und als Topic */adc_val_mv* veröffentlicht.



Im *ROS Subscribe* Block des Simulinkmodells wird der Topic */adc_val* und dessen Nachrichtentyp *std_msgs/UInt16* ausgewählt.

Weiter existiert wie im Abschnitt 10.4.1 ein *ROS Publish Block*, in dem das neue Topic mit dem ADC-Wert in Millivolt */adc_val_mv* mit Nachrichtentyp *std_msgs/UInt16* angegeben ist.

Über den Menüpunkt *Simulation > PREPARE > ROS Network* wird unter *ROS Master (ROS)* die IP-Adresse (hier *192.168.178.71*) des BB eingegeben, damit der Simulinkknoten den ROS-Master auf dem BB finden kann.

Auf dem BB muss nun auch sichergestellt sein, dass die richtige IP-Adresse des Masters in der Datei *~/.bashrc* abgelegt ist. Dazu diese mit *nano ~/.bashrc* editieren und in der untersten Zeile zweimal die IP-Adresse des BB (hier *192.168.178.71*) einfügen.

export

```
ROS_MASTER_URI=http://192.168.178.71:1131112
export ROS_HOSTNAME=192.168.178.71
```

Achtung:

Anschließend müssen mit dem Befehl *source ~/.bashrc* diese neuen Umgebungsvariablen für jedes Terminalfenster aktiviert werden.

Danach werden mit *roscore* der ROS-Master und mit *rosrun srp_init adc_talker.py* der adc_talker-Knoten auf dem BB gestartet.

Nun kann auf dem PC unter Simulink im Menüpunkt *Simulation > PREPARE > ROS Network* abgefragt werden, ob der ROS-Master auf dem BB erreichbar ist. Ist dies der Fall, dann wird schlussendlich im Tab *Simulation* von Simulink der Knoten durch Klicken des runden grünen *Run*-Buttons gestartet.

Im Simulinkmodell werden die Integerwerte und die auf Millivolt umgerechneten Werte des ADC angezeigt. Auf dem BB erscheint nach Eingabe des Befehls *rostopic list* bzw. *rostopic list* der Simulink ROS-Knoten bzw. dessen Topic.

Output *rostopic list*:

```
/ADCIntTalker
/adccconv_subpub_xxxxx
/rosout
```

Output *rostopic list*:

```
/adc_val
/adc_val_mv
/rosout
/rosout_agg
```

Übertragen auf die Aufgaben des PAT wäre */adc_val* der Messwert des Ultraschallsensors (Knoten auf BB). Der Kalman-Filter und die Regelung in Form eines PC-Simulinkknotens berechnen daraus eine Solldrehzahl der Motoren, was */adc_val_mv* entspricht. Der Knoten für die Motorsteuerung (auf dem BB) abonniert diese Solldrehzahl.

11 Anhang

11.1 Pinkonfiguration Übersicht

Hier ist jeweils die Konfiguration (Quelle: [3]) angegeben, bei der alle möglichen Pins der jeweiligen Pinkonfiguration (zu Lasten der anderen Pinkonfigurationen) aktiviert sind. Die Pins der analogen Eingänge (in Lila dargestellt) können nicht anders konfiguriert werden. Auch die in Rot unterlegten Pins können nicht geändert werden. Siehe hierzu auch [34].

8 PWMs and 4 timers

P8	P9	
DGND	1 2 DGND	DGND 1 2 DGND
VDD_3V3	3 4 VDD_3V3	VDD_3V3 3 4 VDD_3V3
VDD_5V	5 6 VDD_5V	VDD_5V 5 6 VDD_5V
SYS_SV	7 8 SYS_SV	SYS_SV 7 8 SYS_SV
PWR_BUT	9 10 SYS_RESETN	PWR_BUT 9 10 SYS_RESETN
GPIO_30	11 12 GPIO_60	GPIO_30 11 12 GPIO_60
GPIO_31	13 14 EHRPWM1A	EHRPWM1A 13 14 EHRPWM1A
GPIO_48	15 16 EHRPWM1B	EHRPWM1B 15 16 EHRPWM1B
GPIO_5	17 18 GPIO_4	GPIO_4 17 18 GPIO_4
I2C2_SCL	19 20 I2C2_SDA	I2C2_SCL 19 20 I2C2_SDA
EHRPWM0B	21 22 EHRPWM0A	EHRPWM0B 21 22 EHRPWM0A
GPIO_49	23 24 GPIO_15	GPIO_49 23 24 GPIO_15
GPIO_115	25 26 GPIO_14	GPIO_115 25 26 GPIO_14
EHRPWM0B	27 28 ECAP PWM2	EHRPWM0B 27 28 ECAP PWM2
GPIO_115	29 30 GPIO_112	GPIO_115 29 30 GPIO_112
EHRPWM0B	31 32 VDD_ADC	EHRPWM0B 31 32 VDD_ADC
AIN4	33 34 GND_ADC	AIN4 33 34 GND_ADC
AIN6	35 36 AIN5	AIN6 35 36 AIN5
AIN2	37 38 AIN3	AIN2 37 38 AIN3
AIN0	39 40 AIN1	AIN0 39 40 AIN1
GPIO_20	41 42 ECAPPWM0	GPIO_20 41 42 ECAPPWM0
DGND	43 44 DGND	DGND 43 44 DGND
DGND	45 46 DGND	DGND 45 46 DGND

65 possible digital I/Os

P8	P9	
DGND	1 2 DGND	DGND 1 2 DGND
VDD_3V3	3 4 VDD_3V3	VDD_3V3 3 4 VDD_3V3
VDD_5V	5 6 VDD_5V	VDD_5V 5 6 VDD_5V
SYS_SV	7 8 SYS_SV	SYS_SV 7 8 SYS_SV
PWR_BUT	9 10 SYS_RESETN	PWR_BUT 9 10 SYS_RESETN
GPIO_30	11 12 GPIO_60	GPIO_30 11 12 GPIO_60
GPIO_31	13 14 EHRPWM2A	EHRPWM2A 13 14 EHRPWM2A
GPIO_48	15 16 EHRPWM1B	EHRPWM1B 15 16 EHRPWM1B
GPIO_5	17 18 GPIO_4	GPIO_4 17 18 GPIO_4
I2C2_SCL	19 20 I2C2_SDA	I2C2_SCL 19 20 I2C2_SDA
EHRPWM0B	21 22 EHRPWM0A	EHRPWM0B 21 22 EHRPWM0A
GPIO_49	23 24 GPIO_15	GPIO_49 23 24 GPIO_15
GPIO_32	25 26 GPIO_14	GPIO_32 25 26 GPIO_14
GPIO_86	27 28 GPIO_88	GPIO_86 27 28 GPIO_88
GPIO_87	29 30 GPIO_89	GPIO_87 29 30 GPIO_89
GPIO_10	31 32 GPIO_11	GPIO_10 31 32 GPIO_11
EHRPWM0B	33 34 EHRPWM1B	EHRPWM0B 33 34 EHRPWM1B
GPIO_9	35 36 EHRPWM1A	GPIO_9 35 36 EHRPWM1A
GPIO_78	37 38 GPIO_79	GPIO_78 37 38 GPIO_79
GPIO_76	39 40 GPIO_77	GPIO_76 39 40 GPIO_77
GPIO_74	41 42 GPIO_75	GPIO_74 41 42 GPIO_75
GPIO_72	43 44 GPIO_73	GPIO_72 43 44 GPIO_73
EHRPWM2A	45 46 EHRPWM2B	EHRPWM2A 45 46 EHRPWM2B

7 analog inputs (1.8V)

P8	P9	
DGND	1 2 DGND	DGND 1 2 DGND
VDD_3V3	3 4 VDD_3V3	VDD_3V3 3 4 VDD_3V3
VDD_5V	5 6 VDD_5V	VDD_5V 5 6 VDD_5V
SYS_SV	7 8 SYS_SV	SYS_SV 7 8 SYS_SV
PWR_BUT	9 10 SYS_RESETN	PWR_BUT 9 10 SYS_RESETN
GPIO_30	11 12 GPIO_60	GPIO_30 11 12 GPIO_60
GPIO_31	13 14 GPIO_50	GPIO_31 13 14 GPIO_50
GPIO_48	15 16 GPIO_51	GPIO_48 15 16 GPIO_51
GPIO_47	16 17 GPIO_55	GPIO_47 16 17 GPIO_55
GPIO_27	17 18 GPIO_65	GPIO_27 17 18 GPIO_65
I2C1_SCL	19 20 I2C1_SDA	I2C1_SCL 19 20 I2C1_SDA
I2C2_SCL	21 22 I2C2_SDA	I2C2_SCL 21 22 I2C2_SDA
GPIO_49	23 24 I2C1_SCL	GPIO_49 23 24 I2C1_SCL
GPIO_117	25 26 I2C1_SDA	GPIO_117 25 26 I2C1_SDA
GPIO_115	27 28 GPIO_113	GPIO_115 27 28 GPIO_113
GPIO_111	29 30 GPIO_112	GPIO_111 29 30 GPIO_112
GPIO_110	31 32 VDD_ADC	GPIO_110 31 32 VDD_ADC
AIN4	33 34 GND_ADC	AIN4 33 34 GND_ADC
AIN6	35 36 AIN5	AIN6 35 36 AIN5
AIN2	37 38 AIN3	AIN2 37 38 AIN3
AIN0	39 40 AIN1	AIN0 39 40 AIN1
GPIO_20	41 42 GPIO_7	GPIO_20 41 42 GPIO_7
DGND	43 44 DGND	DGND 43 44 DGND
DGND	45 46 DGND	DGND 45 46 DGND

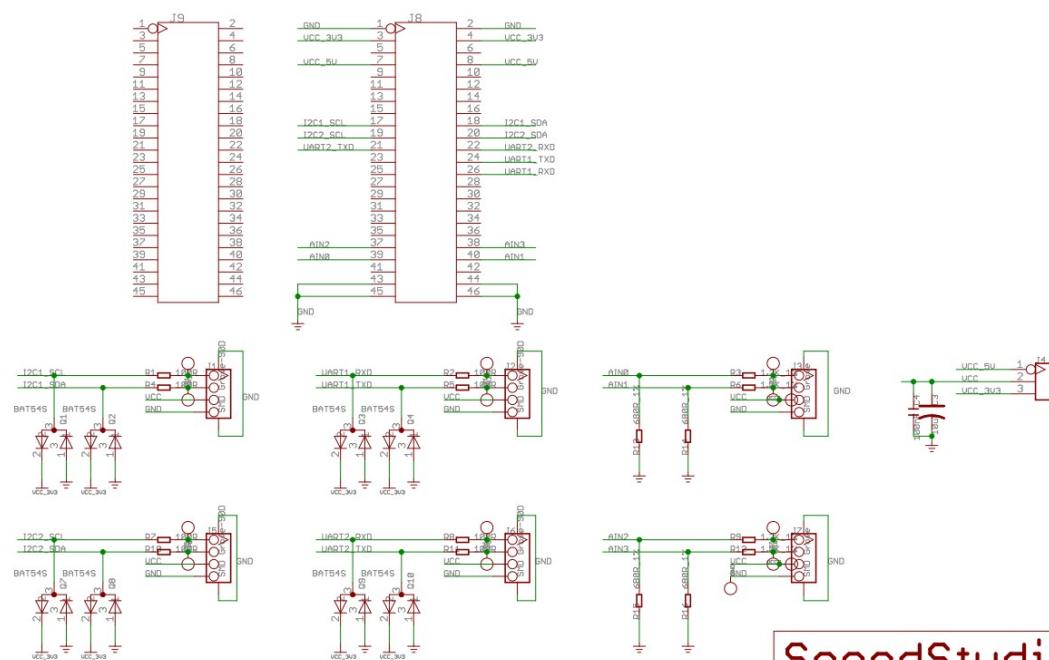
2 I2C ports

P8	P9	
DGND	1 2 DGND	DGND 1 2 DGND
VDD_3V3	3 4 VDD_3V3	VDD_3V3 3 4 VDD_3V3
VDD_5V	5 6 VDD_5V	VDD_5V 5 6 VDD_5V
SYS_SV	7 8 SYS_SV	SYS_SV 7 8 SYS_SV
PWR_BUT	9 10 SYS_RESETN	PWR_BUT 9 10 SYS_RESETN
GPIO_30	11 12 GPIO_60	GPIO_30 11 12 GPIO_60
GPIO_31	13 14 GPIO_50	GPIO_31 13 14 GPIO_50
GPIO_48	15 16 GPIO_51	GPIO_48 15 16 GPIO_51
GPIO_47	16 17 GPIO_55	GPIO_47 16 17 GPIO_55
GPIO_27	17 18 GPIO_65	GPIO_27 17 18 GPIO_65
I2C1_SCL	19 20 I2C1_SDA	I2C1_SCL 19 20 I2C1_SDA
I2C2_SCL	21 22 I2C2_SDA	I2C2_SCL 21 22 I2C2_SDA
GPIO_49	23 24 I2C1_SCL	GPIO_49 23 24 I2C1_SCL
GPIO_117	25 26 I2C1_SDA	GPIO_117 25 26 I2C1_SDA
GPIO_115	27 28 GPIO_113	GPIO_115 27 28 GPIO_113
GPIO_111	29 30 GPIO_112	GPIO_111 29 30 GPIO_112
GPIO_110	31 32 VDD_ADC	GPIO_110 31 32 VDD_ADC
AIN4	33 34 GND_ADC	AIN4 33 34 GND_ADC
AIN6	35 36 AIN5	AIN6 35 36 AIN5
AIN2	37 38 AIN3	AIN2 37 38 AIN3
AIN0	39 40 AIN1	AIN0 39 40 AIN1
GPIO_20	41 42 GPIO_7	GPIO_20 41 42 GPIO_7
DGND	43 44 DGND	DGND 43 44 DGND
DGND	45 46 DGND	DGND 45 46 DGND

11.2 Das Grove Cape Version 1 (schwarz)

Quelle: [10]. Diese alte Version wird im PAT nur verwendet, denn die Schnittstellen des Grove Cape Version 2 nicht ausreichen. Alle Codebeispiele beziehen sich auf die neue Version 2.

GPIO siehe Abschn. 11.8	Entsprechende Pins der Buchsenleiste am BB	Beschriftung Grove-Stecker auf Cape Version 2	Primäre Verwendung im PAT und Alternative dazu
5 CL, 4 DA	P9_17 CL, P9_18 DA, VCC, GND	J1: I2C1	I ² C1, alt. bin. I/O, SPI
13 CL, 12 DA	P9_19 CL, P9_20 DA, VCC, GND	J5: I2C2/CAN0	I ² C2, alt. bin. I/O, SPI, CAN
14 RX, 15 TX	P9_26 RX, P9_24 TX, VCC, GND	J2: UART1	UART1, alt. bin. I/O, I ² C, CAN
84, 85	P9_22, P9_21, VCC, GND	J6: UART2	PWM, alt. bin. I/O, UART, I ² C, SPI
-	P9_39, P9_40, VCC, GND	J3: AIN0, AIN1	-
-	P9_37, P9_38, VCC, GND	J7: AIN2, AIN3	-
84, 85	Selbe Belegung wie UART2	Oberer Stecker auf BBG-Board neben USER-Button (UART2)	PWM, alt. bin. I/O, UART, I ² C, SPI
13 CL, 12 DA	Selbe Belegung wie I2C2	Unterer Stecker auf BBG-Board (I2C2)	I ² C2, alt. CAN, Timer



SeeedStudio

Die digitalen Schnittstellen P9_17-22, P9_24 und P9_26 sind durch eine Diodenschaltung auf dem Grove Cape gegen Spannungen <0 V und >3,3 V geschützt.

In den analogen Eingängen P9_37-40 (ADCs) ist ein Spannungsteiler integriert, der die Eingangsspannung von 5 V auf 1,8 V herunter teilt, damit selbst bei einer 5 V Eingangsspannung der ADC nicht zerstört wird. Bei 5 V VCC wird der komplette der Full Scale Range des 12 bit ADCs von 0...1800 mV genutzt, bei 3,3 V nur ein entsprechend kleinerer Bereich.

Die Schnittstellen des BB sind vor einer falschen Spannung geschützt, egal welche VCC auf dem Cape gewählt ist. Die VCC-Einstellung ändert jedoch nicht die Pegel der digitalen Ausgänge.

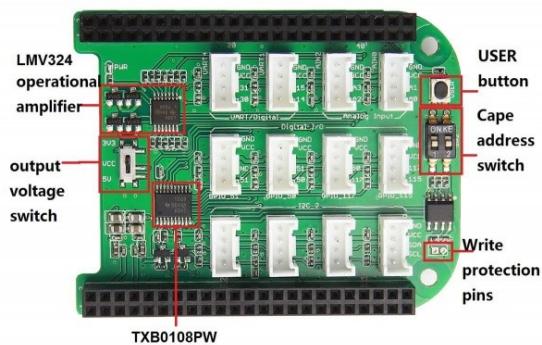
Achtung:

Die Buchsenleiste J8 entspricht P9 und die Buchsenleiste J9 entspricht P8!

Die Buchsenleisten des Capes sind zu denen des BB durchkontaktiert, also nicht gegen Verpolung oder Überspannung geschützt.

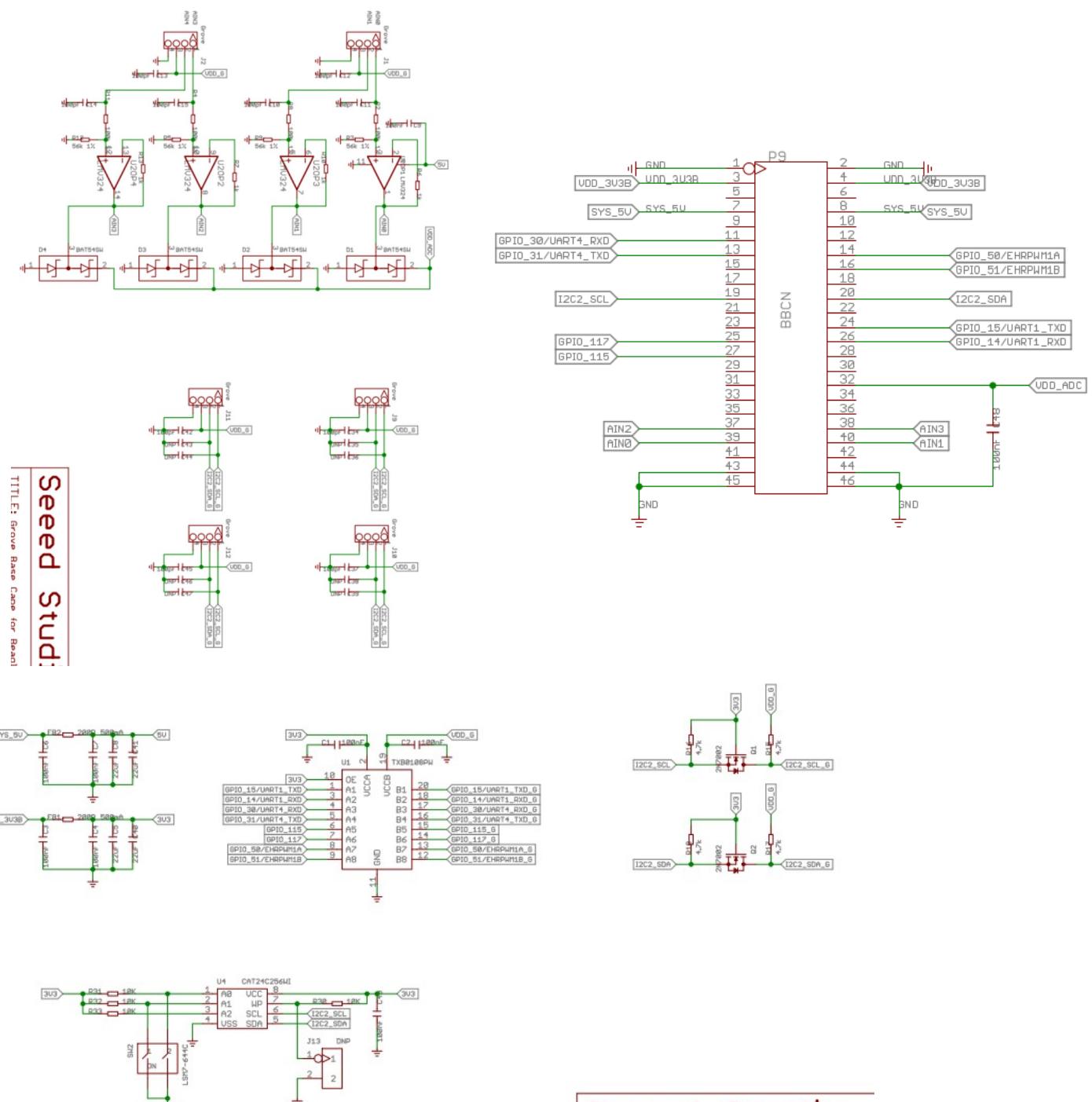
Verwenden Sie daher als Eingänge ausschließlich die Grove-Stecker!

11.3 Das Grove Base Cape Version 2 (grün)



Im PAT wird vorzugsweise diese neue Version 2 verwendet. Die analogen Eingänge werden nicht wie in Version 1 nur über einen einfachen Spannungsteiler sondern zusätzlich über einen Verstärker geführt. Das Cape kann mit VCC 3,3 V und 5 V betrieben werden. Der Spannungsteiler sowie der Verstärkungsfaktor sind unabhängig von VCC, so dass der ADC immer bei 5 V voll ausgesteuert ist. Nach dem Verstärker begrenzen Klemmdiode die ADC-Eingangsspannung auf 0...1,8 V. Die digitalen Ein- und Ausgänge laufen anders als bei Version 1 nicht mehr über Klemmdiode sondern über Pegelwandler.

Quelle: [35].



Seeed Studio

11.4 Nano Text Editor Cheat Sheet

File handling

Ctrl+S	Save current file
Ctrl+O	Offer to write file ("Save as")
Ctrl+R	Insert a file into current one
Ctrl+X	Close buffer, exit from nano

Editing

Ctrl+K	Cut current line into cutbuffer
Alt+6	Copy current line into cutbuffer
Ctrl+U	Paste contents of cutbuffer
Alt+T	Cut until end of buffer
Ctrl+]	Complete current word
Alt+3	Comment/uncomment line/region
Alt+U	Undo last action
Alt+E	Redo last undone action

Search and replace

Ctrl+Q	Start backward search
Ctrl+W	Start forward search
Alt+Q	Find next occurrence backward
Alt+W	Find next occurrence forward
Alt+R	Start a replacing session

Deletion

Ctrl+H	Delete character before cursor
Ctrl+D	Delete character under cursor
Ctrl+Shift+Del	Delete word to the left
Ctrl+Del	Delete word to the right
Alt+Del	Delete current line

Operations

Ctrl+T	Run a spell check
Ctrl+J	Justify paragraph or region
Alt+J	Justify entire buffer
Alt+B	Run a syntax check
Alt+F	Run a formatter/fixer/arranger
Alt+:	Start/stop recording of macro
Alt+;	Replay macro

Moving around

Ctrl+B	One character backward
Ctrl+F	One character forward
Ctrl+←	One word backward
Ctrl+→	One word forward
Ctrl+A	To start of line
Ctrl+E	To end of line
Ctrl+P	One line up
Ctrl+N	One line down
Ctrl+↑	To previous block
Ctrl+↓	To next block
Ctrl+Y	One page up
Ctrl+V	One page down
Alt+\	To top of buffer
Alt+/-	To end of buffer

Special movement

Alt+G	Go to specified line
Alt+]	Go to complementary bracket
Alt+↑	Scroll viewport up
Alt+↓	Scroll viewport down
Alt+<	Switch to preceding buffer
Alt+>	Switch to succeeding buffer

Information

Ctrl+C	Report cursor position
Alt+D	Report word/line/char count
Ctrl+G	Display help text

Various

Alt+A	Turn the mark on/off
Tab	Indent marked region
Shift+Tab	Unindent marked region
Alt+N	Turn line numbers on/off
Alt+P	Turn visible whitespace on/off
Alt+V	Enter next keystroke verbatim
Ctrl+L	Refresh the screen
Ctrl+Z	Suspend nano

Quelle: [36]

11.5 Linux Cheat Sheet

File Commands	System Info
<code>ls</code> - directory listing	<code>date</code> - show the current date and time
<code>ls -al</code> - formatted listing with hidden files	<code>cal</code> - show this month's calendar
<code>cd dir</code> - change directory to <i>dir</i>	<code>uptime</code> - show current uptime
<code>cd</code> - change to home	<code>w</code> - display who is online
<code>pwd</code> - show current directory	<code>whoami</code> - who you are logged in as
<code>mkdir dir</code> - create a directory <i>dir</i>	<code>finger user</code> - display information about <i>user</i>
<code>rm file</code> - delete <i>file</i>	<code>uname -a</code> - show kernel information
<code>rm -r dir</code> - delete directory <i>dir</i>	<code>cat /proc/cpuinfo</code> - cpu information
<code>rm -f file</code> - force remove <i>file</i>	<code>cat /proc/meminfo</code> - memory information
<code>rm -rf dir</code> - force remove directory <i>dir</i> *	<code>man command</code> - show the manual for <i>command</i>
<code>cp file1 file2</code> - copy <i>file1</i> to <i>file2</i>	<code>df</code> - show disk usage
<code>cp -r dir1 dir2</code> - copy <i>dir1</i> to <i>dir2</i> ; create <i>dir2</i> if it doesn't exist	<code>du</code> - show directory space usage
<code>mv file1 file2</code> - rename or move <i>file1</i> to <i>file2</i> if <i>file2</i> is an existing directory, moves <i>file1</i> into directory <i>file2</i>	<code>free</code> - show memory and swap usage
<code>ln -s file link</code> - create symbolic link <i>link</i> to <i>file</i>	<code>whereis app</code> - show possible locations of <i>app</i>
<code>touch file</code> - create or update <i>file</i>	<code>which app</code> - show which <i>app</i> will be run by default
<code>cat > file</code> - places standard input into <i>file</i>	Compression
<code>more file</code> - output the contents of <i>file</i>	<code>tar cf file.tar files</code> - create a tar named <i>file.tar</i> containing <i>files</i>
<code>head file</code> - output the first 10 lines of <i>file</i>	<code>tar xf file.tar</code> - extract the files from <i>file.tar</i>
<code>tail file</code> - output the last 10 lines of <i>file</i>	<code>tar czf file.tar.gz files</code> - create a tar with Gzip compression
<code>tail -f file</code> - output the contents of <i>file</i> as it grows, starting with the last 10 lines	<code>tar xzf file.tar.gz</code> - extract a tar using Gzip
Process Management	<code>tar cjf file.tar.bz2</code> - create a tar with Bzip2 compression
<code>ps</code> - display your currently active processes	<code>tar xjf file.tar.bz2</code> - extract a tar using Bzip2
<code>top</code> - display all running processes	<code>gzip file</code> - compresses <i>file</i> and renames it to <i>file.gz</i>
<code>kill pid</code> - kill process id <i>pid</i>	<code>gzip -d file.gz</code> - decompresses <i>file.gz</i> back to <i>file</i>
<code>killall proc</code> - kill all processes named <i>proc</i> *	Network
<code>bg</code> - lists stopped or background jobs; resume a stopped job in the background	<code>ping host</code> - ping <i>host</i> and output results
<code>fg</code> - brings the most recent job to foreground	<code>whois domain</code> - get whois information for <i>domain</i>
<code>fg n</code> - brings job <i>n</i> to the foreground	<code>dig domain</code> - get DNS information for <i>domain</i>
File Permissions	<code>dig -x host</code> - reverse lookup <i>host</i>
<code>chmod octal file</code> - change the permissions of <i>file</i> to <i>octal</i> , which can be found separately for user, group, and world by adding:	<code>wget file</code> - download <i>file</i>
<ul style="list-style-type: none"> ● 4 - read (r) ● 2 - write (w) ● 1 - execute (x) 	<code>wget -c file</code> - continue a stopped download
Examples:	Installation
<code>chmod 777</code> - read, write, execute for all	Install from source: <code>./configure</code>
<code>chmod 755</code> - rwx for owner, rx for group and world	<code>make</code>
For more options, see <code>man chmod</code> .	<code>make install</code>
SSH	<code>dpkg -i pkg.deb</code> - install a package (Debian)
<code>ssh user@host</code> - connect to <i>host</i> as <i>user</i>	<code>rpm -Uvh pkg.rpm</code> - install a package (RPM)
<code>ssh -p port user@host</code> - connect to <i>host</i> on port <i>port</i> as <i>user</i>	Shortcuts
<code>ssh-copy-id user@host</code> - add your key to <i>host</i> for <i>user</i> to enable a keyed or passwordless login	<code>Ctrl+C</code> - halts the current command
Searching	<code>Ctrl+Z</code> - stops the current command, resume with <code>fg</code> in the foreground or <code>bg</code> in the background
<code>grep pattern files</code> - search for <i>pattern</i> in <i>files</i>	<code>Ctrl+D</code> - log out of current session, similar to <code>exit</code>
<code>grep -r pattern dir</code> - search recursively for <i>pattern</i> in <i>dir</i>	<code>Ctrl+W</code> - erases one word in the current line
<code>command grep pattern</code> - search for <i>pattern</i> in the output of <i>command</i>	<code>Ctrl+U</code> - erases the whole line
<code>locate file</code> - find all instances of <i>file</i>	<code>Ctrl+R</code> - type to bring up a recent command
	<code>!!</code> - repeats the last command
	<code>exit</code> - log out of current session
	* use with extreme caution.

Quelle: [37]



11.6 Glossar

Bash-Shell:

Wir auf dem PC ein Terminalfenster geöffnet, dann wird dazu automatisch ein Programm gestartet, welches die im Fenster eingegebenen Textbefehle entgegennimmt, interpretiert und ausführt. Dieses Programm ist üblicherweise die sogenannte "local" „Bash-Shell“ des Linuxbetriebssystems des PC. Das Terminalfenster an sich wird auch „Konsole“ genannt. Baut man in diesem Terminalfenster eine SSH-Verbindung mit dem BB auf, so erscheint darin automatisch die "remote" Bash-Shell des Linuxbetriebssystems des BB.

Toolchain:

Hierunter versteht man die „Kette aus Werkzeugen“, die benötigt wird, um ein Programm für ein eingebettetes System zu schreiben, zu kompilieren, auf das System zu übertragen und dort zu debuggen.

Cross Compiler:

Der Compiler erstellt aus einem Quellcode ein ausführbares Programm. Dies geschieht meistens auf einem PC, wobei das ausführbare Programm ebenfalls für einen PC der selben Art gedacht ist. Wird auf einem PC der Quellcode erstellt, das ausführbare Programm soll aber auf dem Linuxbetriebssystem des BB verwendet werden, dann muss der Quellcode entweder auf dem BB kompiliert werden, oder auf dem PC muss ein Cross Compiler eingesetzt werden.

Target:

Das eingebettete System (hier das LES BB), auf welches von einem PC aus zugegriffen wird. Wird auch „remote machine“ genannt im Gegensatz zum PC, der als „local machine“ bezeichnet wird.

Host und Client Computer:

Ein Client ist ein Computer, der eine Dienstleistung eines Host-Computers in Anspruch nimmt. Baut man im Terminalfenster des PC eine SSH-Verbindung mit dem BB auf, dann wird der PC zum Client des Host-Computers BB.

Pfad:

Auch PATH genannt. Eine Liste von Verzeichnissen, in denen das Betriebssystem nach einer ausführbaren Programmdatei sucht, nachdem man deren Namen (ohne „./“) in das Terminalfenster eingegeben hat.

Kernel:

Damit ist das eigentliche Linuxbetriebssystem gemeint. Der Kernel ist ein C-Programm, das für die entsprechende Rechnerplattform wie den BB kompiliert wird und dann als Image auf die Plattform übertragen wird. Diese ausführbare Datei findet sich unter `/boot`.

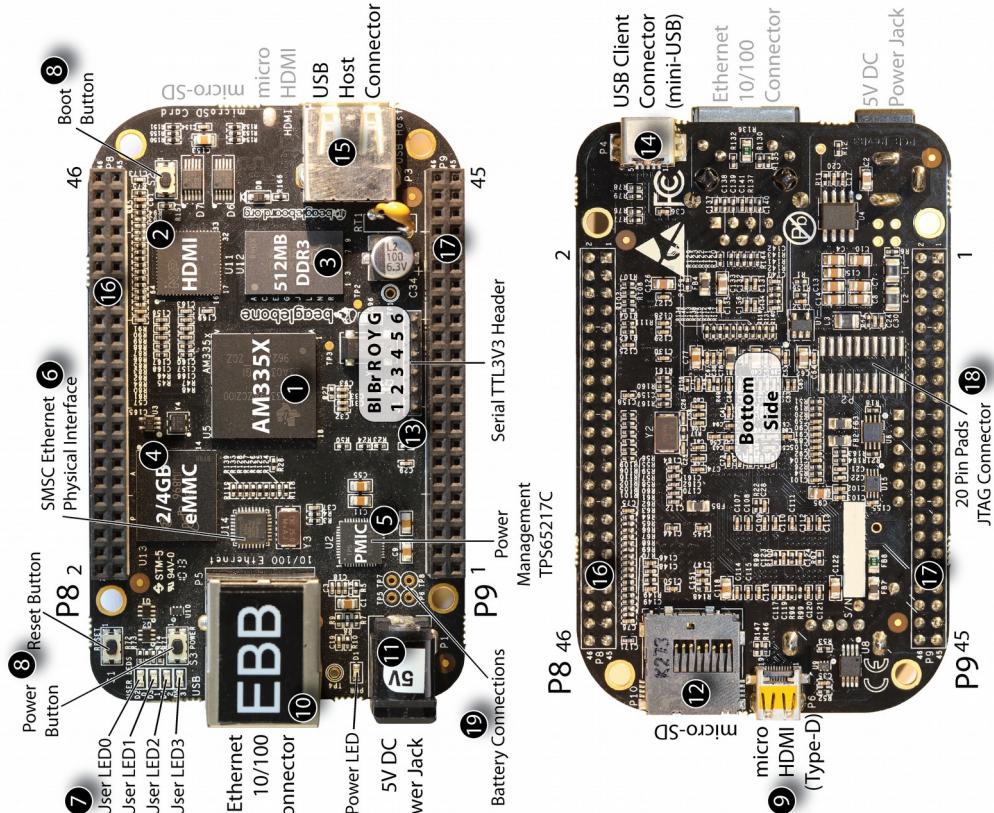
Image:

Hiermit ist eine 1:1 bitweise Kopie des Speichermediums des BB gemeint. Ein Image kann aus dem Internet (meist komprimiert) heruntergeladen werden und auf die SD-Karte bzw. den eMMC des BB übertragen werden. Umgekehrt kann der Ist-Zustand des Speichermediums des BB als Image auf einen PC gesichert und von da aus auf SD-Karten anderer BB geklont werden.

Zu den ROS-Begriffen findet sich in [12], Kapitel 4.1 "ROS Terminology" ein exzellenter Glossar.

THE BEAGLEBONE BLACK

Function	Physical	Details
1 Processor	AM335x	A powerful Texas Instruments Sitara 1GHz ARM-A8 processor that is capable of 2 billion instructions per second.
	2 x PRUs	Programmable Real-time Units. Microcontrollers that allow for real-time interfacing. Discussed in Chapter 13.
	Graphics Engine	Processor has a 3D graphics engine (SGX530), which is capable of rendering 20million polygons per second.
2 Graphics	HDMI Framer	The framer converts the LCD interface available on the AM335x processor into a HDMI signal (no HDCP).
3 Memory	512MB DDR3	The amount of system memory affects performance and the type of applications that can be run.
4 Storage	eMMC (MMC1)	A 2/4 GB on-board embedded multimedia card (eMMC)—an SD card on a chip. The BBB can boot without an SD card.
5 Power Management	TPS65217C	Power management IC (PMIC). Sophisticated power management IC that has 4 LDO voltage regulators for the power rails. This IC is controlled via i2C.
6 Ethernet Processor	Ethernet PHY (10/100)	Can be immediately connected to a network (supports DHCP). The physical interface LAN8710A connects the physical RJ45 connector to the ARM microprocessor.
7 LEDs	7 x LEDs	Power LED (blue), 4 user LEDs (blue), and 2 LEDs on the RJ45 Ethernet socket (yellow = 100M link up, green = traffic).
8 Buttons	3 x Buttons	Power button for powering on/off. Reset button for resetting the board and boot switch button for choosing to boot from the eMMC or the SD card.
9 Video Out	micro-HDMI (HDMI-D) Audio Out (HDMI-D)	For connecting to monitors and televisions. Supports resolutions up to (1280x1024 at 60Hz). It can run 1920x1080 but only at 24Hz. Has HDMI CEC support. See the Optional Accessories section for details on how to break this out with a regular 3.5 mm audio jack.
10 Network	Ethernet (RJ45)	10/100 Ethernet via a RJ45 connector. No on-board Wi-Fi. See the section on Optional Accessories in this chapter.
11 DC Power	5V DC Supply (5.5mm)	For connecting 5V mains PSUs to the BBB. See the Highly Recommended Accessories section in this chapter.
12 SD Card	SD Card slot (MMC0) (micro-SD)	3.3V/micro-SD card slot. BBB can be booted from this slot, flashed from this slot, or used for additional storage when booting from the eMMC.
13 Serial Debug	6 Pin Connector (6 x 0.1")	(UART0) Used with a serial TTL3V cable to connect to the serial console of the BBB (this is not a JTAG connector—see the Highly Recommended Accessories section).
14 USB	1xUSB 2.0 Client (mini-USB)	USB 2.0 Client (USB-B) Connects to your desktop computer and can power the BBB directly and/or communicate to it.
15 USB	1xUSB 2.0 Host (USB-A)	(USB-L) You can connect USB peripherals (e.g., Wi-Fi, keyboard, webcams) to the BBB with this USB connector. You can use a USB hub to add more than one USB device.
16 P8 and P9 Expansion Headers	Two 2x23 pin 0.1" female headers	92 pins in two headers that are multiplexed to provide access to the features in Figure 1-5. Not all functionality is available at the same time. Can be used to connect capes, additional hardware and software.
18 Other Debug	JTAG	There is space for a JTAG connector on the bottom of the board. JTAG allows you to debug your board, but requires additional hardware and software.
19 Other Power	Battery Connectors	It is possible to solder pins and use these points to connect a battery supply. Read the SRM carefully!



© John Wiley & Sons, 2014

EXPLORING BEAGLEBONE
TOOLS AND TECHNIQUES FOR BUILDING WITH EMBEDDED LINUX

www.ExploringBeagleBone.com

11.8 Pinconfiguration detailliert

Quelle: [23], siehe auch [34]

Pin	\$PINS	GPIO	ADDR	Offset from:	Name	Mode7	Mode6	Mode5	Mode4	Mode3	Mode2	Mode1	Mode0	CPU	Notes		
P8_01					DGND										Ground		
P8_02				44@10800	GPIO16	38	GPIO1_6	gpio1[6]						mmc1_dat6	gpmc_ad6		
P8_03	6		0x8180 018		GPIO17	39	GPIO1_7	gpio1[7]						mmc1_dat7	gpmc_ad7		
P8_04	7		0x8180 01c		GPIO1_2	34	GPIO1_2	gpio1[2]						mmc1_dat2	gpmc_ad2		
P8_05	2		0x830 008		GPIO1_3	35	GPIO1_3	gpio1[3]						mmc1_dat3	gpmc_ad3		
P8_06	3		0x80c 00c		GPIO1_4	36	TIMER4	gpio2[2]						gpmc_adn_aie	R7		
P8_07	36		0x890 090		GPIO2 2	67	TIMER7	gpio2[3]						gpmc_per_en	T7		
P8_08	37		0x894 094		GPIO2 3	68	TIMER5	gpio2[5]						gpmc_be0_n_ce	T6		
P8_09	39		0x89c 09c		GPIO2 4	68	TIMER6	gpio2[4]						gpmc_wen	U6		
P8_10	38		0x89e 098		GPIO1_13	45	GPIO1_12	gpio1[13]	pr1_pru0_pru_30_15	eQEP2B_in	mmc2_dat1	mmc1_dat5	lcd_data18	gpmc_ad13	R12		
P8_11	13		0x834 034		GPIO1_12	44	GPIO1_12	gpio1[12]	pr1_pru0_pru_30_14	EOP2A_IN	MMC2_DAT0	MMC1_DAT4	LCD_Data19	GPMC_A12	T12		
P8_12	12		0x830 030		GPIO2 20	23	EHRPWM2B	gpio0[23]		ehrpwm2B	mmc2_dat5	mmc1_dat1	lcd_data22	gpmc_ad9	T10		
P8_13	9		0x824 024		GPIO2 28	28	GPIO0_28	gpio0[28]		ehrpwm2_trigzone_in	mmc2_dat6	mmc1_dat2	lcd_data21	gpmc_ad10	T11		
P8_14	10		0x828 028		GPIO1_16	47	GPIO1_16	gpio1[5]	pr1_pru0_pru_31_15	eQEP2_strobe	mmc2_dat3	mmc1_dat7	lcd_data16	gpmc_ad15	U13		
P8_15	15		0x830 03c		GPIO1_14	46	GPIO1_14	gpio1[4]	pr1_pru0_pru_31_14	eQEP2_index	mmc2_dat2	mmc1_dat3	lcd_data17	gpmc_ad14	V13		
P8_16	14		0x830 038		GPIO0_27	27	GPIO0_27	gpio0[27]		ehrpwm0_sync0	mmc2_dat0	mmc1_dat0	gpmc_ad11	U12			
P8_17	11		0x82c 02c		GPIO2 1	65	GPIO2 1	gpio2[1]		mmc2_clk	gpmc_wait1	lcd_memory_clk	gpmc_clk_mux0	V12			
P8_18	35		0x88c 08c		GPIO1 22	22	EHRPWM2A	gpio0[22]		ehrpwm2A	mmc2_dat4	mmc1_dat0	gpmc_dat23	gpmc_ad8	U10		
P8_19	8		0x820 020		GPIO1 31	63	GPIO1 31	gpio1[31]	pr1_pru1_pru_31_13	pr1_pru1_pru_30_13		mmc1_cnd	gpmc_be_in	gpmc_csn2	V9	Allocated mmc2	
P8_20	33		0x88d 084		GPIO1_30	62	GPIO1_30	gpio1[30]	pr1_pru1_pru_31_12	pr1_pru1_pru_30_12		mmc1_clk	gpmc_csn1	gpmc_csn1	U9	Allocated mmc2	
P8_21	32		0x880 080		GPIO1_5	37	GPIO1_5	gpio1[5]				mmc1_dat5	gpmc_ad5	V8	Allocated mmc2		
P8_22	5		0x814 014		GPIO1_4	36	GPIO1_4	gpio1[4]				mmc1_dat4	gpmc_ad4	U8	Allocated mmc2		
P8_23	4		0x810 010		GPIO1_1	33	GPIO1_1	gpio1[1]				mmc1_dat1	gpmc_ad1	V7	Allocated mmc2		
P8_24	1		0x804 004		GPIO0 0	32	GPIO1_0	gpio1[0]				mmc1_dat0	gpmc_ad0	U7	Allocated mmc2		
P8_25	0		0x800 000		GPIO7 07c	61	GPIO1_29	gpio1[29]				gpmc_csn0	gpmc_csn0	V6			
P8_26	31		0x87c 027c		GPIO1_22	86	GPIO1_22	gpio1[22]	pr1_pru1_pru_31_8	pr1_pru1_pru_30_8		lcd_sync	lcd_pk	lcd_pk	U5	Allocated HDMI	
P8_27	56		0x860 00e0		GPIO2_24	88	GPIO2_24	gpio2[24]	pr1_pru1_pru_31_10	pr1_pru1_pru_30_10		gpmc_a10	gpmc_a10	lcd_pk	V5	Allocated HDMI	
P8_28	58		0x864 00e8		GPIO2_23	87	GPIO2_23	gpio2[23]	pr1_pru1_pru_31_9	pr1_pru1_pru_30_9		gpmc_a9	gpmc_a9	lcd_pk	R5	Allocated HDMI	
P8_29	57		0x864 0e4		GPIO2_25	89	GPIO2_25	gpio2[25]	pr1_pru1_pru_31_11	pr1_pru1_pru_30_11		gpmc_a11	gpmc_ac_bias_en	lcd_pk	V6	Allocated HDMI	
P8_30	59		0x8ec 0e0c		UART5_CTSN	10	UART5_CTSN	gpio0[10]	uart5_ctsn		mcasp0_axr1	eQEP1_index	gpmc_a18	lcd_pk	V4	Allocated HDMI	
P8_31	54		0x8cd 0d8		UART5_RTSN	11	UART5_RTSN	gpio0[11]	uart5_rsn		mcasp0_axr3	eQEP1_strobe	gpmc_a19	lcd_pk	T5	Allocated HDMI	
P8_32	53		0x8dc 0dc		UART3_RTSN	9	UART3_RTSN	gpio0[9]	uart4_rsn		mcasp0_axr3	eQEP1_in	gpmc_a17	lcd_pk	V3	Allocated HDMI	
P8_33	52		0x8dd 0d0d		UART3_RTSN	81	UART3_RTSN	gpio0[8]	uart3_rsn		mcasp0_axr2	mcasp0_axr2	gpmc_a15	lcd_pk	U4	Allocated HDMI	
P8_34	51		0x8cc 0cc		UART5_RXD	78	UART5_RXD	gpio2[16]	uart2_ctsn		mcasp0_axr2	mcasp0_axr0	gpmc_a16	lcd_pk	V2	Allocated HDMI	
P8_35	52		0x8bd 0d0d		UART5_RXD	79	UART5_RXD	gpio2[15]	uart2_ctsn		mcasp0_axr2	mcasp0_axr0	gpmc_a14	lcd_pk	U3	Allocated HDMI	
P8_36	50		0x8cb 0c8		GPIO2 11	72	GPIO2 11	gpio2[8]	pr1_pru1_pru_31_2	pr1_pru1_pru_30_2		mcasp0_axr0	mcasp0_axr0	gpmc_a12	lcd_pk	U1	Allocated HDMI
P8_37	48		0x8cd 0c0		GPIO2 12	73	GPIO2 12	gpio2[12]	pr1_pru1_pru_31_6	pr1_pru1_pru_30_6		mcasp0_axr0	mcasp0_axr0	gpmc_a13	lcd_pk	U2	Allocated HDMI
P8_38	49		0x8c4 0c4		GPIO2 12	76	GPIO2 12	gpio2[12]	pr1_pru1_pru_31_6	pr1_pru1_pru_30_6		eQEP2_index	gpmc_a6	lcd_pk	T3	Allocated HDMI	
P8_39	46		0x8bb 0b8		GPIO2 13	77	GPIO2 13	gpio2[13]	pr1_pru1_pru_31_7	pr1_edio_data_out7	eQEP2_strobe	eQEP2_strobe	gpmc_a7	lcd_pk	T4	Allocated HDMI	
P8_40	47		0x8bc 0bc		GPIO2 10	74	GPIO2 10	gpio2[10]	pr1_pru1_pru_31_4	pr1_pru1_pru_30_4		eQEP2A_in	gpmc_a4	lcd_pk	T1	Allocated HDMI	
P8_41	44		0x8bb 0b0		GPIO2 11	75	GPIO2 11	gpio2[11]	pr1_pru1_pru_31_5	pr1_pru1_pru_30_5		eQEP2B_in	gpmc_a5	lcd_pk	T2	Allocated HDMI	
P8_42	45		0x8bd 0b4		GPIO2 11	72	GPIO2 11	gpio2[8]	pr1_pru1_pru_31_2	pr1_pru1_pru_30_2		ehrpwm2_ipzone_in	ehrpwm2_ipzone_in	gpmc_a2	R3	Allocated HDMI	
P8_43	42		0x8a8 0a8		GPIO2 9	73	GPIO2 9	gpio2[9]	pr1_pru1_pru_31_3	pr1_pru1_pru_30_3		ehrpwm0_ipzone_in	ehrpwm0_ipzone_in	gpmc_a3	R4	Allocated HDMI	
P8_44	43		0x8ac 0a8c		GPIO2 6	70	GPIO2 6	gpio2[6]	pr1_pru1_pru_31_0	pr1_pru1_pru_30_0		ehrpwm2A_ipzone_in	ehrpwm2A_ipzone_in	gpmc_a0	R1	Allocated HDMI	
P8_45	40		0x8ad 0aa0		GPIO2 7	71	GPIO2 7	gpio2[7]	pr1_pru1_pru_31_1	pr1_pru1_pru_30_1		ehrpwm2B_ipzone_in	ehrpwm2B_ipzone_in	gpmc_a1	R2	Allocated HDMI	
P8_46	41		0x8ad 0a4		GPIO NO.	Name	Mode 7	Mode 6	Mode 5	Mode 4	Mode 3	Mode 2	Mode 1	Mode 0	CPU		
P9 Header	cat \$PINS	ADDR +													www.ExploringBeagleBone.com		

The BeagleBone Black P8 Header

EXPLORING BEAGLEBONE
TOOLS AND TECHNIQUES FOR BUILDING WITH EMBEDDED LINUX

Pin	\$PINS	ADDR	GPIO	Name	Mode7	Mode6	Mode5	Mode4	Mode3	Mode2	Mode1	Mode0	CPU	Notes
P9_01	44e0000			GND									Ground	
P9_02		Offset from:		GND									Ground	
P9_03	44e00800			DC_3.3V									250mA Max Current	
P9_04				DC_3.3V									250mA Max Current	
P9_05		VDD_5V											1A Max Current	
P9_06		VDD_5V											1A Max Current	
P9_07		SYS_5V											250mA Max Current	
P9_08		SYS_5V											250mA Max Current	
P9_09		PWR_BTN											5V Level (pulled up PMIC)	
P9_10		SYS_RESETn											RESET_OUT	A10
P9_11	28	0x870070	30	UART1_RXD	gpios[30]	uart1_rxn_mux2	minc1_scl0	min2_crs_dy	gpmc_csn4	miu2_crs	miu2_col	miu2_near	gpios_wd0	T17
P9_12	30	0x870078	60	GPIO1_28	gpios[28]	mcapo_aclkr_mux3	gpmc_dir	minc2_dat3	gpmc_csn6	miu2_rxerr	miu2_txerr	miu2_txerr	gpmc_bein	U18
P9_13	29	0x870074	31	UART1_TXD	gpios[31]	uart1_brd_mux2	minc2_scl0	min2_rxerr	gpmc_csn5	miu2_txerr	miu2_txerr	miu2_txerr	gpmc_wpn	U17
P9_14	18	0x840048	50	EHRPWM1A	gpios[18]	ehtpmi1A_mux1	gpmc_a18	minc2_dat1	rgm2_tx3	miu2_tx3	miu2_tx3	miu2_tx3	gpmc_a2	U14
P9_15	16	0x840040	48	GPIO1_16	gpios[16]	ehtpmi1_lpmzone_input	gpmc_a16	miu2_ben	miu2_tell	miu2_ben	miu2_ben	miu2_ben	gpmc_a0	R13
P9_16	19	0x84004c	51	EHRPWM1B	gpios[19]	ehtpmi1B_mux1	gpmc_a19	minc2_dat2	rgm2_tx2	miu2_tx2	miu2_tx2	miu2_tx2	gpmc_a3	U14
P9_17	87	0x85c15c	5	I2C1_SCL	gpios[5]		pr1_uart0_ldx	ehtrwm0_synci	I2C1_SCL	mmi2_sdwp	spif2_sd0	spif2_sd0	spif2_sd0	A16
P9_18	86	0x85b158	4	I2C1_SDA	gpios[4]		pr1_uart0_rxd	ehtrwm0_irpzone	I2C1_SDA	mmi1_sdwp	spif0_d1	spif0_d1	spif0_d1	B16
P9_19	95	0x87c17c	13	I2C2_SCL	gpios[13]		pr1_uart0_hs_n	sp1_csi1	I2C2_SCL	mmi2_sd5	uart1_ltsi	uart1_ltsi	uart1_ltsi	D17
P9_20	94	0x87c178	12	I2C2_SDA	gpios[12]		pr1_uart0_dts_n	sp1_csi0	I2C2_SDA	dcano1_kx	tmr6	uart1_dtsn	uart1_dtsn	D18
P9_21	85	0x85b154	3	UART2_RXD	gpios[3]	EMU3_mux1	pr1_uart0_hs_n	ehtrwm0	I2C2_SCL	uart2_ldx	spif2_sd0	spif2_sd0	spif2_sd0	B17
P9_22	84	0x85b150	2	UART2_RXD	gpios[2]	EMU2_mux1	pr1_uart0_dts_n	ehtrwm0	I2C2_SDA	uart2_ndx	spif0_sd0	spif0_sd0	spif0_sd0	A17
P9_23	17	0x8401044	49	GPIO1_17	gpios[17]	ehtrwm0_sync0	gpmc_a17	mmi2_dat0	rgm2_ndv	gpm2_ndv	gpmc_a1	gpmc_a1	gpmc_a1	V14
P9_24	97	0x8841184	15	UART1_RXD	gpios[15]	pr1_uart0_prn_31_16	pr1_uart0_ldx	I2C1_SCL	dcano1_ix	mmi2_sdwp	uart1_bdf	uart1_bdf	uart1_bdf	D15
P9_25	107	0x8ac1ac	117	GPIO3_21	gpios[21]	pr1_prn0_prn_31_7	pr1_prn0_prn_30_7	EMU4_mux2	mcasp1_axr1	mcasp0_axr3	eQEP0_strobe	mcasp0_axlk	mcasp0_axlk	A14
P9_26	96	0x8801180	14	UART1_RXD	gpios[14]	pr1_prn1_prn_31_16	pr1_prn1_prn_30_16	EMU2_mux2	I2C1_SDA	dcano1_ix	mmc1_swmp	uart1_ndx	uart1_ndx	D16
P9_27	105	0x8aa4144	115	GPIO3_19	gpios[19]	pr1_prn0_prn_31_5	pr1_prn0_prn_30_5	mcasp1_axr3	mcasp1_axr3	eQEP0_in	mcasp0_lsri	mcasp0_lsri	mcasp0_lsri	C13
P9_28	103	0x898c19c	113	SPH_CS0	gpios[17]	pr1_prn0_prn_31_3	pr1_prn0_prn_30_3	eCAP2_in_PWM2_out	mcasp1_c50	mcasp0_axr2	ehtpm0_synci	mcasp0_axlk	mcasp0_axlk	C12
P9_29	101	0x8941194	111	SPH_D0	gpios[15]	pr1_prn0_prn_31_1	pr1_prn0_prn_30_1	mmc1_scl0_mux1	sp1_d0	ehtrwm0	mcasp0_fsx	mcasp0_fsx	mcasp0_fsx	B13
P9_30	102	0x8986198	112	SPH_D1	gpios[16]	pr1_prn0_prn_31_2	pr1_prn0_prn_30_2	mmc2_scl0_mux1	sp1_d1	ehtrwm0_lipzone	mcasp0_ax0	mcasp0_ax0	mcasp0_ax0	D12
P9_31	100	0x8901190	110	SP1_SCLK	gpios[14]	pr1_prn0_prn_31_0	pr1_prn0_prn_30_0	mmc0_scl0_mux1	sp1_sd0	ehtrwm0_A	mcasp0_axlk	mcasp0_axlk	mcasp0_axlk	A13
P9_32				VADC									1.8 ADC Volt Ref.	
P9_33				AIN4									C8	1.8V input.
P9_34				AGND									Ground for ADC	
P9_35				AIN6									A8	1.8V input.
P9_36				AIN5									B8	1.8V input.
P9_37				AIN2									B7	1.8V input.
P9_38				AIN3									A7	1.8V input.
P9_39				AIN0									B6	1.8V input.
P9_40				AIN1									C7	1.8V input.
P9_41A	109	0xbcb104	20	CLKOUT2	gpios[20]	EMU3_mux0	pr1_prn0_prn_31_16	tictkin		xhma_event_intr1	mcasp1_ax0	mcasp1_ax0	mcasp1_ax0	D14
P9_41B	0x8a01048	116	GPIO3_20	gpios[20]	pr1_prn0_prn_31_6	pr1_prn0_prn_30_6	emr3	mcasp1_ax0	eQEP0_index	mcasp0_axr1	mcasp0_axr1	mcasp0_axr1	D13	
P9_42A	89	0x8a61044	7	GPIO0_7	gpios[7]	xhma_event_int2	mmc0_sdwp	sp1_sd0	pr1_ecap0_ecap0_apwm0_0	uart3_brd	ecAP0_in_PWM0_out	ecAP0_in_PWM0_out	ecAP0_in_PWM0_out	C18
P9_42B	0x8a01040	114	GPIO3_18	gpios[18]	pr1_prn0_prn_31_4	pr1_prn0_prn_30_4	Mcasp1_axlk	Mcasp1_axlk	Mcasp0_axr_in	Mcasp0_axr_in	Mcasp0_axr_in	Mcasp0_axr_in	Mcasp0_axr_in	B12
P9_43				GND									- See Pg 50 of the SRM	
P9_44				GND									Ground	
P9_45				GND									Ground	
P9_46	cat	ADDR +	(Mode 7)	GND									Ground	
P9	\$PINS	ADDR	GPIO No.	Name	Mode 7								Notes	

11.9 Pinkonfiguration nach dem Booten des PAT-Image

Das Utility *show-pins* gibt nach dem Booten folgenden Output:

```
beagle@beaglebone:~$ sudo show-pins | sort
P8.03 / eMMC d6          6 fast rx up 1 mmc 1 d6      mmc@481d8000 (pinmux_emmc_pins)
P8.04 / eMMC d7          7 fast rx up 1 mmc 1 d7      mmc@481d8000 (pinmux_emmc_pins)
P8.05 / eMMC d2          2 fast rx up 1 mmc 1 d2      mmc@481d8000 (pinmux_emmc_pins)
P8.06 / eMMC d3          3 fast rx up 1 mmc 1 d3      mmc@481d8000 (pinmux_emmc_pins)
P8.07                      36 fast rx up 7 gpio 2.02 << hi P8_07 (pinmux_P8_07_default_pin)
P8.08                      37 fast rx up 7 gpio 2.03 << hi P8_08 (pinmux_P8_08_default_pin)
P8.09                      39 fast rx up 7 gpio 2.05 << hi P8_09 (pinmux_P8_09_default_pin)
P8.10                      38 fast rx up 7 gpio 2.04 << hi P8_10 (pinmux_P8_10_default_pin)
P8.11                      13 fast rx down 7 gpio 1.13 << lo P8_11 (pinmux_P8_11_default_pin)
P8.12                      12 fast rx down 7 gpio 1.12 << lo P8_12 (pinmux_P8_12_default_pin)
P8.13                      9 fast rx down 7 gpio 0.23 << lo P8_13 (pinmux_P8_13_default_pin)
P8.14                      10 fast rx down 7 gpio 0.26 << lo P8_14 (pinmux_P8_14_default_pin)
P8.15                      15 fast rx down 7 gpio 1.15 << lo P8_15 (pinmux_P8_15_default_pin)
P8.16                      14 fast rx down 7 gpio 1.14 << lo P8_16 (pinmux_P8_16_default_pin)
P8.17                      11 fast rx down 7 gpio 0.27 << lo P8_17 (pinmux_P8_17_default_pin)
P8.18                      35 fast rx down 7 gpio 2.01 << lo P8_18 (pinmux_P8_18_default_pin)
P8.19                      8 fast rx down 7 gpio 0.22 << lo P8_19 (pinmux_P8_19_default_pin)
P8.20 / eMMC cmd          33 fast rx up 2 mmc 1 cmd   mmc@481d8000 (pinmux_emmc_pins)
P8.21 / eMMC clk          32 fast rx up 2 mmc 1 clk   mmc@481d8000 (pinmux_emmc_pins)
P8.22 / eMMC d5          5 fast rx up 1 mmc 1 d5      mmc@481d8000 (pinmux_emmc_pins)
P8.23 / eMMC d4          4 fast rx up 1 mmc 1 d4      mmc@481d8000 (pinmux_emmc_pins)
P8.24 / eMMC d1          1 fast rx up 1 mmc 1 d1      mmc@481d8000 (pinmux_emmc_pins)
P8.25 / eMMC d0          0 fast rx up 1 mmc 1 d0      mmc@481d8000 (pinmux_emmc_pins)
P8.26                      31 fast rx up 7 gpio 1.29 << hi P8_26 (pinmux_P8_26_default_pin)
P8.27 / hdmi              56 fast rx down 7 gpio 2.22 << lo P8_27 (pinmux_P8_27_default_pin)
P8.28 / hdmi              58 fast rx down 7 gpio 2.24 << lo P8_28 (pinmux_P8_28_default_pin)
P8.29 / hdmi              57 fast rx down 7 gpio 2.23 << lo P8_29 (pinmux_P8_29_default_pin)
P8.30 / hdmi              59 fast rx down 7 gpio 2.25 << lo P8_30 (pinmux_P8_30_default_pin)
P8.31 / hdmi / sysboot 14 54 fast rx down 7 gpio 0.10 << lo P8_31 (pinmux_P8_31_default_pin)
P8.32 / hdmi / sysboot 15 55 fast rx down 7 gpio 0.11 << lo P8_32 (pinmux_P8_32_default_pin)
P8.33 / hdmi / sysboot 13 53 fast rx down 7 gpio 0.09 << lo P8_33 (pinmux_P8_33_default_pin)
P8.34 / hdmi / sysboot 11 51 fast rx down 7 gpio 2.17 << lo P8_34 (pinmux_P8_34_default_pin)
P8.35 / hdmi / sysboot 12 52 fast rx down 7 gpio 0.08 << lo P8_35 (pinmux_P8_35_default_pin)
P8.36 / hdmi / sysboot 10 50 fast rx down 7 gpio 2.16 << lo P8_36 (pinmux_P8_36_default_pin)
P8.37 / hdmi / sysboot 8  48 fast rx down 7 gpio 2.14 << lo P8_37 (pinmux_P8_37_default_pin)
P8.38 / hdmi / sysboot 9  49 fast rx down 7 gpio 2.15 << lo P8_38 (pinmux_P8_38_default_pin)
P8.39 / hdmi / sysboot 6  46 fast rx down 7 gpio 2.12 << lo P8_39 (pinmux_P8_39_default_pin)
P8.40 / hdmi / sysboot 7  47 fast rx down 7 gpio 2.13 << lo P8_40 (pinmux_P8_40_default_pin)
P8.41 / hdmi / sysboot 4  44 fast rx down 7 gpio 2.10 << lo P8_41 (pinmux_P8_41_default_pin)
P8.42 / hdmi / sysboot 5  45 fast rx down 7 gpio 2.11 << lo P8_42 (pinmux_P8_42_default_pin)
P8.43 / hdmi / sysboot 2  42 fast rx down 7 gpio 2.08 << lo P8_43 (pinmux_P8_43_default_pin)
P8.44 / hdmi / sysboot 3  43 fast rx down 7 gpio 2.09 << lo P8_44 (pinmux_P8_44_default_pin)
P8.45 / hdmi / sysboot 0  40 fast rx down 7 gpio 2.06 << lo P8_45 (pinmux_P8_45_default_pin)
P8.46 / hdmi / sysboot 1  41 fast rx down 7 gpio 2.07 << lo P8_46 (pinmux_P8_46_default_pin)
P9.11                      28 fast rx up 7 gpio 0.30 << hi P9_11 (pinmux_P9_11_default_pin)
P9.12                      30 fast rx up 7 gpio 1.28 << hi P9_12 (pinmux_P9_12_default_pin)
P9.13                      29 fast rx up 7 gpio 0.31 << hi P9_13 (pinmux_P9_13_default_pin)
P9.14                      18 fast rx down 7 gpio 1.18 << lo P9_14 (pinmux_P9_14_default_pin)
P9.15                      16 fast rx down 7 gpio 1.16 << hi P9_15 (pinmux_P9_15_default_pin)
P9.15                      34 fast rx up 7 gpio 2.00
P9.16                      19 fast rx down 7 gpio 1.19 << lo P9_16 (pinmux_P9_16_default_pin)
P9.17 / spi boot cs        87 fast rx up 7 gpio 0.05 << hi P9_17 (pinmux_P9_17_default_pin)
P9.18 / spi boot out       86 fast rx up 7 gpio 0.04 << hi P9_18 (pinmux_P9_18_default_pin)
P9.19 / cape i2c scl       95 fast rx up 3 i2c 2 scl    ocp/P9_19_pinmux (pinmux_P9_19_default_pin)
P9.20 / cape i2c sda       94 fast rx up 3 i2c 2 sda   ocp/P9_20_pinmux (pinmux_P9_20_default_pin)
P9.21 / spi boot in        85 fast rx up 7 gpio 0.03 << hi P9_21 (pinmux_P9_21_default_pin)
P9.22 / spi boot clk        84 fast rx up 7 gpio 0.02 << hi P9_22 (pinmux_P9_22_default_pin)
P9.23                      17 fast rx down 7 gpio 1.17 << lo P9_23 (pinmux_P9_23_default_pin)
P9.24                      97 fast rx up 7 gpio 0.15 << hi P9_24 (pinmux_P9_24_default_pin)
P9.25 / audio osc          107 fast rx down 7 gpio 3.21 << lo P9_25 (pinmux_P9_25_default_pin)
P9.26                      96 fast rx up 7 gpio 0.14 << lo P9_26 (pinmux_P9_26_default_pin)
P9.27                      105 fast rx down 7 gpio 3.19 << lo P9_27 (pinmux_P9_27_default_pin)
P9.28 / hdmi audio data    103 fast rx down 7 gpio 3.17 << lo P9_28 (pinmux_P9_28_default_pin)
P9.29 / hdmi audio fs       101 fast rx down 7 gpio 3.15 << lo P9_29 (pinmux_P9_29_default_pin)
P9.30                      102 fast rx down 7 gpio 3.16 << lo P9_30 (pinmux_P9_30_default_pin)
P9.31 / hdmi audio clk      100 fast rx down 7 gpio 3.14 << lo P9_31 (pinmux_P9_31_default_pin)
P9.41                      106 fast rx down 7 gpio 3.20 << lo P9_91 (pinmux_P9_91_default_pin)
P9.41 / jtag emu3          109 fast rx down 7 gpio 0.20 << lo P9_41 (pinmux_P9_41_default_pin)
P9.42                      104 fast rx down 7 gpio 3.18 << lo P9_92 (pinmux_P9_92_default_pin)
P9.42                      89 fast rx down 7 gpio 0.07 << lo P9_42 (pinmux_P9_42_default_pin)
```

11.10 Paketmanagement über apt

Nachfolgend sind die wichtigsten Befehle für das Paketmanagement via *apt-get* aufgeführt. Der Platzhalter *MeinPaket* steht für ein Softwarepaket wie z.B. *nano*.

Paket installieren	<code>apt-get install MeinPaket</code>
Index Paketmanager aktualisieren	<code>apt-get update</code>
Ist <i>MeinPaket</i> installiert?	<code>dpkg-query -1 grep MeinPaket</code>
Ist ein Paket mit <i>MeinPaket</i> verfügbar?	<code>apt-cache search MeinPaket</code>
Das Paket <i>MeinPaket</i> entfernen Wie oben aber mit Konfigurationsdateien	<code>apt-get remove MeinPaket</code> <code>apt-get purge MeinPaket</code>
Nicht mehr benötigte Pakete (Abhängigkeiten) entfernen	<code>apt-get autoremove</code>
Hilfe zu <i>apt</i> aufrufen	<code>apt-get help</code>

Statt *apt-get* kann in den meisten Fällen auf der Befehl *apt* verwendet werden. *apt-get* und *apt* sind lediglich leicht unterschiedliche Frontends der Paketverwaltung.

11.11 Verwendete Abkürzungen

PAT	Sensor- und Regelungssystempraktikum
BB	BeagleBone
BBB	BeagleBone Black
BBG	BeagleBone Green
μC	Mikrocontroller
LES	Linux Embedded System
PRU	Programmable Real-Time Unit
SSH	Sichere Kommunikation über Ethernet in einem Terminalfenster. SSH ist ein Protokoll.
IDE	Entwicklungsumgebung für das Programmieren (z.B. Cloud9, Eclipse, Arduino und im weiteren Sinne auch MATLAB/Simulink)
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
APT	Advanced Packaging Tool für das Paketmanagement unter Linux, Aufruf mit <i>apt-get</i>
GPIO	General Purpose Input Output, Schnittstellen zur I/O-Peripherie wie Schalteins-/ausgänge, PWM-Ausgänge oder digitale Busse.
DTO	Device Tree Overlay (Pinkonfiguration zur Laufzeit)
I/Os	Ein-/Ausgabeschnittstellen
DT	Device Tree (Pinkonfiguration beim Bootvorgang)
BASH	Bourne Again Shell. Das auf Linuxsystemen am häufigsten verwendete Shellprogramm, welches Befehle in einem Terminalfenster entgegennimmt und interpretiert.

11.12 Kommunikationsmöglichkeiten mit dem BB

Zum Programmieren oder für die Fehlersuche beim BB muss man mit ihm via Tastatur und Bildschirm kommunizieren. Dafür gibt es eine Reihe verschiedener Möglichkeiten, die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst sind.

	An-schluss	Linux Benutzeroberfläche	Terminalfenster (Shell)	Internetseiten auf dem BB	Cloud9 IDE	Internetzugang	Bemerkung
Tastatur und Monitor direkt	USB bzw. HDMI	Direkt	Über Linux Benutzeroberfläche	Über Linux-Browser	Über Linux-Browser	Ja, wenn Verbindung über Netzwerkbuchse	Geht nur bei BBB
Ethernet über USB	Micro/Mini USB-Buchse Unterseite BBG/BBB	Auf dem PC über TCP/IP mit VNC-Software am PC und VNC-Server am BB	Auf dem PC über SSH-Protokoll und Bash Shell direkt am BB	Über den PC-Browser plattformunabhängig	Über den PC-Browser plattformunabhängig	Ja, wenn Verbindung über Netzwerkbuchse oder mit Trick	Stromversorgung über USB oder 5 V Buchse bzw. VDD_5V
Ethernet	Netzwerkbuchse	siehe oben	siehe oben	siehe oben	siehe oben	Ja, wenn Internetgateway im selben Netzwerk	Zusätzlich Stromversorgung nötig, PC, BB und Internetgateway im selben Netzwerk
Seriell	Serial Debug Pins auf Oberseite	Nein	Wie oben aber ohne SSH	Nein	Nein	Nein	Einige Möglichkeit um Bootmeldungen zu empfangen

11.13 Fachbücher zum BB

Buch	Bemerkung
BeagleBone Cook-book [4]	Behandelt überwiegend BoneScript in Form von Projektanleitungen, jedoch gutes Kapitel „Real-Time I/Os“ in dem die verschiedenen Möglichkeiten der PRU-Nutzung sowie spezielle C-Bibliotheken vorgestellt werden (z.B. PRU Speak).
BeagleBone For Dummies [5]	Neben BoneScript gute Einführung in Python (mit BBIO Adafruit Bibliothek), ansonsten aber zum größten Teil Makerbuch mit vielen konkreten Projekten aber wenig Tiefe.
30 BeagleBone Black Projects for the Evil Genius [38]	Reines Makerbuch überwiegend basierend auf BoneScript, konkrete Bauanleitungen mit wenig Tiefe.
BeagleBone Home Automation[39]	Verwendet Python und befasst sich mit Server-Client Kommunikation, Android wird ebenfalls berücksichtigt. Jedoch nur wenige Infos bezüglich I/Os.
BeagleBone Robotic Projects [40]	Verwendet Python und Bildverarbeitung (OpenCV über Python). Wenig Tiefe da mehr Makerbuch mit Anleitung für Robotikprojekte.
BeagleBone Black Cookbook [7]	Verwendet BoneScript, C-Programmierung und Python (mit BBIO Adafruit Bibliothek), gutes Kapitel 6 zu RealTime I/Os auch mit PRU (PyPRUSS), SDR-Beispiel. Inhaltlich mit mittlerer Tiefe, insgesamt jedoch recht unstrukturiertes Makerbuch
Programming the BeagleBone [41]	Makerbuch mit BoneScript und Python (mit BBIO Adafruit Bibliothek), ein wenig IoT mit REST-API. Insgesamt aber wenig Inhalt und Tiefe.
Exploring the BeagleBone, Second Edition [2]	Mit Abstand das umfassendste, am besten strukturierte und umfangreichste Buch zum BB. auf den zugehörigen Internetseiten [3] finden sich viele Videos, Codebeispiele und Aktualisierungen. Dieses Buch ist ein Muss, wenn man sich ernsthaft mit dem BB befasst.

11.14 Tastenkombinationen für dem Terminal-Multiplexer Terminator

Kombination	Auswirkung
Strg + ⌘ + O	Das Terminal horizontal teilen
Strg + ⌘ + E	Das Terminal vertikal teilen
Strg + ⌘ + S	Die Bildlaufleiste verstecken
Strg + ⌘ + W	Das aktuelle Terminal schließen
Strg + ⌘ + Q	Programm beenden
Strg + ⌘ + T	Einen neuen Reiter öffnen
Strg + ⌘ + N	Zum nächsten Terminal wechseln
Strg + ⌘ + P	Zum vorherigen Terminal wechseln
Strg + ⌘ + X	Vollbildanzeige des aktiven Terminals
F11	Vollbild-Modus
"Drag & Drop"	
Strg + rechte Maustaste	Terminal zum positionieren aufnehmen
Strg loslassen	Position anzeigen lassen
rechte Maustaste loslassen	Terminal an Position positionieren

Quelle siehe [17].

11.15 Bash-Skript zum SSH-Verbindungsaubau via USB / WLAN

```
#!/bin/bash
wifi_ip=beaglebone.local
echo .....
echo Verbindung wird über WiFi-Adresse $wifi_ip hergestellt
echo .....
echo
ssh $wifi_ip -l beagle -p 22
```

11.16 Arduino-Firmware *UARTComm_BB_Ardुino.ino* zum Testen der UART-Verbindung

Achtung:

Wenn die UART-Verbindung direkt über die Buchsenleisten hergestellt wird, dann muss unbedingt ein Arduino mit 3,3 V Pegel verwendet werden, da sonst der BB durch Überspannung zerstört wird.

Diese Arduino-Firmware sendet nach einem Reset mit 115200 Baud über die UART-Schnittstelle (D0: RX, D1: TX) im Sekundentakt den String "n: Arduino bereit...warte auf Input..." wobei n jeweils um 1 inkrementiert wird. Sobald der Arduino auf seinem RX-Pin ein Zeichen empfangen hat, leuchtet die LED13 kurz auf, eine ADC-Messung wird durchgeführt und das vorher empfangene Zeichen wird zusammen mit dem Wandlerwert in LSB (10 Bit) auf die Schnittstelle ausgegeben.

```
int adc_val= 0; // Ausgabewert ADC
int inByte = 0; // Auf RX empfangenes Byte

void setup()
{
  pinMode(13,OUTPUT);
  int i=0;
  Serial.begin(115200, SERIAL_8N1);
  while(Serial.available()<=0){ // Warten bis Zeichen auf RX zum Start
    Serial.print(i,DEC);
    Serial.println(": Arduino bereit...warte auf Input...");
    delay(1000);
    i+=1;
  }
}
```

```

void loop()
{
    if (Serial.available() > 0) { // Zeichen empfangen
        inByte = Serial.read();
        Serial.flush();
        adc_val = analogRead(A0);
        Serial.write(inByte);
        Serial.print(",");
        Serial.println(adc_val, DEC);
        digitalWrite(13,HIGH);
        delay(100);
        digitalWrite(13,LOW);
    }
}

```

11.17 Bash-Skript zum Überprüfen und Wiederherstellen der WLAN-Verbindung

```

#!/bin/bash
echo none > /sys/class/leds/beaglebone\:green\:usr3/trigger
iwgetid >/dev/null

if [ $? != 0 ]
then
    connmanctl disable wifi 2>/dev/null
    connmanctl enable wifi
else
    echo timer > /sys/class/leds/beaglebone\:green\:usr3/trigger
fi

```

Um das obige Skript via Cron ausführen zu lassen muss es nach /usr/local/bin kopiert werden. Dann wird mit dem Befehl sudo nano etc/crontab in der Datei crontab folgende Zeile eingefügt:

```
*1 * * * * root bash /usr/local/bin/wifi_reset.sh
```

11.18 Stückliste RoboToGo

Bezeichnung	Stückzahl	Lieferant (Beispiel)	Bestellnummer	Kosten pro Stk. ca.	Kosten pro Roboter
BeagleBone Green	1	exp-tech.de, mouser.de	EXP-R02-452	42,00 €	42,00 €
MicroSDHC-Speicherplatte 16GB - SanDisk Ultra	1	reichelt.de	SDSQUAR016GGN6-MA	6,00 €	6,00 €
Beaglebone Seed Grove Cape V2	1	exp-tech.de, mouser.de	EXP-R02-524	9,00 €	9,00 €
Grove 4-Pin Female Jumper zu Grove 4-Pin	1	reichelt.de, exp-tech.de	GRV 4PIN F2GRV	1,00 €	1,00 €
Grove Kabel 4-Pin Male auf Jumper	2	reichelt.de, exp-tech.de	GRV 4PIN2JUMPER	1,00 €	2,00 €
Pololu Ball Caster with 1/2" Plastic Ball #952	1	exp-tech.de	EXP-R25-295	2,00 €	2,00 €
Steckboard, Breadboard 400 (300/100) transparent	1	exp-tech.de	EXP-T07-002	4,00 €	4,00 €
Pololu TB6612FNG Dual Motor Driver Carrier	1	exp-tech.de	EXP-R25-28	5,00 €	5,00 €
Adafruit Proto Plate for Beagle Bone & Beagle Bone Black	1	exp-tech.de	EXP-R15-023	9,00 €	9,00 €
SRF02 Ultraschallsensor	1	exp-tech.de	EXP-R11-002	14,00 €	14,00 €
Getriebemotor mit Rad, 3 .. 9 V DC	2	reichelt.de	COM MOTOR04	4,00 €	8,00 €
Ansmann Powerbank, Li-Ion, 6600mAh	1	reichelt.de	ANS 1700-0088	14,00 €	14,00 €
USB A Stecker offene Kabelenden GND / VDD_5V	1	reichelt.de	DELOCK 85250	3,00 €	3,00 €
Elko, radial, 1,0 mF, 25 V, RM 5,0, 85°C, 2000h, 20%	1	reichelt.de	M-A 1,0M 25	0,50 €	0,50 €
Edimax EW-7811UN WLAN-Adapter, USB, 150 MBit/s	1	reichelt.de	EDIMAX EW-7811UN	6,00 €	6,00 €
Kabelbinder, 280 mm	1	reichelt.de	KAB-U 280-4,8	0,00 €	0,00 €
Gummifüsse, 19 x 4 mm	2	reichelt.de	3M SJ 5344 CLEAR	0,50 €	1,00 €
Klingeldraht, 2x25 cm verdrillt	2	reichelt.de	KLINGELDRAHT	0,00 €	0,00 €
Steckbrücken M-M Blau	2	reichelt.de	STECKBOARD...	0,50 €	1,00 €
Steckbrücken M-M Rot	1	reichelt.de	STECKBOARD...	0,50 €	0,50 €
Steckbrücken M-M Gelb	1	reichelt.de	STECKBOARD...	0,50 €	0,50 €
Steckbrücken M-M Weiß	1	reichelt.de	STECKBOARD...	0,50 €	0,50 €
Steckbrücken M-M Lila	1	reichelt.de	STECKBOARD...	0,50 €	0,50 €
Steckbrücken M-M Schwarz	1	reichelt.de	STECKBOARD...	0,50 €	0,50 €
					Summe: 130,00 €

Quellenverzeichnis

- 1: elinux.org, Ubuntu-ROS-Image für BeagleBone:
elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack_Debian#ROS_.28ROS_Melodic_Morenia.29_-_Weekly. Letzter Aufruf 2/2020.
- 2: DFRobot Pirate-4WD-Plattform: dfrobot.com. Letzter Aufruf 06/2016.
- 3: Molloy, D.: Exploring Beaglebone, Second Edition. Wiley, Indianapolis, 2019.
- 4: BeagleBoard.org Foundation: beagleboard.org. Letzter Aufruf 02/2020.
- 5: Yoder, M. A. et al.: BeagleBone Cookbook. O'Reilly, Sebastopol, 2015.
- 6: Santos, R. et al.: BeagleBone for Dummies. JohnWiley, Hoboken, 2015.
- 7: Adafruit Inc.: learn.adafruit.com/category/beaglebone. Letzter Aufruf 02/2020.
- 8: Hamilton, C. A.: BeagleBone Black Cookbook. Packt Publishing, Birmingham, 2015.
- 9: Hersteller Seeed, China: wiki.seeedstudio.com/BeagleBone_Green/. Letzter Aufruf 02/2020.
- 10: Distributor EXP GmbH, Saarbrücken: exp-tech.de. Letzter Aufruf 02/2020.
- 11: Hersteller Seeed, China: seeed.cc. Letzter Aufruf 02/2020.
- 12: Bartmann, Erik: Die elektronische Welt mit Raspberry Pi entdecken. O'Reilly, Sebastopol, 2016.
- 13: Pyo, Y. S.: ROS Robot programming. ROBOTIS Co., Ltd., 2017.
- 14: ROS.org, offizielle Wikiseiten: wiki.ros.org/ROS/Introduction. Letzter Aufruf 02/2020.
- 15: ROS.org, offizielle Installationsanleitungen: wiki.ros.org/melodic/Installation/Ubuntu. Letzter Aufruf 02/2020.
- 16: Verwendung von pip unter Ubuntu.: matthew-brett.github.io/pydagogue/installing_on_debian.html. Letzter Aufruf 02/2020.
- 17: ROS.org, offizielle Tutorials: wiki.ros.org/ROS/Tutorials/NavigatingTheFilesystem. Letzter Aufruf 02/2020.
- 18: Terminal-Multiplexer Terminator: wiki.ubuntuusers.de/Terminator/. Letzter Aufruf 02/2020.
- 19: Tool show-pins zur Ausgabe der kompletten Pinkonfiguration: github.com/mvduin/bbb-pin-utils. Letzter Aufruf 03/2020.
- 20: Setting up a Raspberry Pi as a WiFi access point: learn.adafruit.com/setting-up-a-raspberry-pi-as-a-wifi-access-point/overview. Letzter Aufruf 11/2016.
- 21: 01 Intel Open Source: Connman: 01.org/connman/documentation. Letzter Aufruf 04/2020.
- 22: Bartmann, Erik: Die elektronische Welt mit Arduino entdecken. O'Reilly, Sebastopol, 2014.
- 23: beaglebone-universal-io, Tool config-pin: github.com/beagleboard/bb.org-overlays/tree/master/tools/beaglebone-universal-io. Letzter Aufruf 02/2020.
- 24: Exploring Beaglebone: exploringbeaglebone.com. Letzter Aufruf 04/2016.
- 25: BeagleBone Black Collars: www.doctormonk.com/2014/01/beaglebone-black-collars.html. Letzter Aufruf 06/2016.
- 26: Beschriftungsaufkleber für BB-Buchsenleisten:
www.logicsupply.com/media/resources/beaglebone/BeagleBonePinGuide.pdf. Letzter Aufruf 10/2018.
- 27: Raspberry Pi: I2C-Konfiguration und -Programmierung: www.netzmafia.de/skripten/hardware/RasPi/RasPi_I2C. Letzter Aufruf 10/2018.
- 27: Raspberry Pi: SPI-Schnittstelle: www.netzmafia.de/skripten/hardware/RasPi/RasPi_SPI. Letzter Aufruf 10/2018.
- 28: Raspberry Pi: Serielle Schnittstelle: netzmafia.de/skripten/hardware/RasPi/RasPi_Serial. Letzter Aufruf 10/2018.
- 29: Download "Digitale Signalverarbeitung mit Python": http://www.pyfda.org/. Letzter Aufruf 10/2018.
- 30: Python in der Schule und Hochschule: www.tec.reutlingen-university.de/prof-mack/mechatronikstudium/python-in-der-schule-und-hochschule/. Letzter Aufruf 02/2020.
- 31: Klein, B.: Einführung in Python 3: Für Ein- und Umsteiger. Hanser Verlag, München, 2014.
- 32: Adafruit BMP Python Library: learn.adafruit.com/using-the-bmp085-with-raspberry-pi/using-the-adafruit-bmp085-python-library. Letzter Aufruf 01/2016.
- 33: Woyand, H.-B.: Python für Ingenieure. Hanser Verlag, München, 2017.
- 34: Beagleboard: Cape Expansion Headers: http://elinux.org/Beagleboard:Cape_Expansion_Headers. Letzter Aufruf 06/2016.
- 36: Grove Base Cape for BeagleBone v2: www.seeedstudio.com/wiki/Grove_Base_Cape_for_BeagleBone_v2. Letzter Aufruf 07/2016.

- 36: Nano Editor Cheat Sheet: www.nano-editor.org/dist/latest/cheatsheet.html. Letzter Aufruf 02/2020.
- 37: Unix/Linux Command Reference: files.fosswire.com/2007/08/fwunixref.pdf. Letzter Aufruf 02/2020.
- 38: Rush, C.: 30 BeagleBone Projects for the Evil Genius. Mv Graw Hill Education, New York, 2014.
- 40: Lumme, J.: BeagleBone Home Automation. Packt Publishing, Birmingham, 2013.
- 41: Grimmet, R.: BeagleBone Robotic Projects. Packt Publishing, Birmingham, 2013.
- 42: Chavan, Y.: Programming the BeagleBone. Packt Publishing, Birmingham, 2016.