

ftDuino
ein **fischertechnik**-kompatibler Arduino



Bedienungsanleitung

Dr.-Ing. Till Harbaum

28. Juli 2019

Für Tanja, Maya, Fabian und Ida

© 2017, 2018, 2019 Dr.-Ing. Till Harbaum <till@harbaum.org>

Projekt-Homepage: <http://ftduino.de>

Kontakt: <mailto:info@ftduino.de>

Forum: <https://forum.ftcommunity.de/>

WEEE-Registrierungsnummer: DE 25270264

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	7
1.1 Das ftDuino-Konzept	7
1.1.1 Das fischertechnik-Baukastensystem	7
1.1.2 Das Arduino-System	8
1.2 Der ftDuino-Controller	9
1.2.1 Mikrocontroller	10
1.2.2 USB-Anschluss	11
1.2.3 Reset-Taster	11
1.2.4 Interne LEDs	11
1.2.5 Spannungsversorgung	11
1.2.6 Anschlüsse	14
1.2.7 Variante mit internem OLED-Display	17
1.2.8 Hinweise für Arduino-erfahrene Nutzer	18
1.3 Problemlösungen	18
1.3.1 Die grüne Leuchtdiode im ftDuino leuchtet nicht	18
1.3.2 Der ftDuino taucht am PC nicht als COM:-Port auf	18
1.3.3 Der ftDuino funktioniert, aber die Ausgänge nicht	18
1.3.4 Der ftDuino lässt sich nicht flashen	19
1.3.5 Der ftDuino wird als Leonardo erkannt	20
2 Installation	22
2.1 Treiber	22
2.1.1 Windows 10	22
2.1.2 Windows 8.0 und Windows 8.1	22
2.1.3 Windows 7 und Windows Vista	23
2.1.4 Linux	24
2.2 Arduino-IDE	26
2.2.1 Arduino-IDE für Linux aus dem Ubuntu-Software-Store	26
2.2.2 Installation mit dem Boardverwalter	26
2.2.3 Updates	28
3 Erste Schritte	30
3.1 Der erste Sketch	30
3.1.1 Download des Blink-Sketches auf den ftDuino	31
3.1.2 Die Funktionsweise des Sketches	32
3.1.3 Die Funktionen <code>setup()</code> und <code>loop()</code>	32
3.1.4 Anpassungen am Sketch	32
3.2 Ansteuerung von fischertechnik-Komponenten	33
3.2.1 Der Sketch	33
3.2.2 Eingänge	34
3.3 Kommunikation mit dem PC	35
3.3.1 Der serielle Monitor	36
3.3.2 Sketchbeschreibung	37
3.3.3 USB-Verbindungsaufbau	37

4 Programmierung	39
4.1 Textbasierte Programmierung	39
4.2 Die Programmiersprache C++	41
4.3 Grundlagen	41
4.3.1 Kommentare	42
4.3.2 Fehlermeldungen	43
4.3.3 Funktionen	44
4.3.4 Die Funktionen <code>setup()</code> und <code>loop()</code>	45
4.3.5 Beispiel	46
4.4 Hilfreiche Bibliotheksfunktionen	46
4.4.1 <code>pinMode(pin, mode)</code>	47
4.4.2 <code>digitalWrite(pin, value)</code>	47
4.4.3 <code>delay(ms)</code>	47
4.4.4 <code>Serial.begin(speed)</code>	48
4.4.5 <code>Serial.print(val)</code> und <code>Serial.println(val)</code>	48
4.4.6 <code>ftduino.input_get()</code> , <code>ftduino.output_set()</code> und <code>ftduino.motor_set()</code>	48
4.5 Variablen	50
4.5.1 Datentyp <code>int</code>	50
4.6 Bedingungen	51
4.6.1 <code>if</code> -Anweisung	51
4.7 Schleifen	52
4.7.1 <code>while</code> -Schleife	52
4.7.2 <code>for</code> -Schleife	53
4.8 Beispiele	54
4.8.1 Einfache Ampel	54
4.8.2 Schranke	55
4.9 Die Warnung Wenig Arbeitsspeicher	56
4.9.1 Auswirkungen	56
4.9.2 Vorbeugende Maßnahmen	57
4.10 Weiterführende Informationen	59
5 ftDuino in der Schule	60
5.1 Grafische Programmierung mit Scratch	60
5.1.1 Scratch-Versionen	61
5.1.2 Scratch 1.4 for Arduino (S4A)	61
5.1.3 Scratch 3.0	62
5.2 Grafische Programmierung mit Blockly/Brickly	64
5.2.1 Brickly	65
5.2.2 Brickly-Lite	66
5.3 Spielerische Programmierung in Minecraft	67
5.4 Textbasierte Programmierung mit der Arduino-IDE	68
5.4.1 Die Arduino-Idee	68
5.4.2 Arduino und ftDuino	69
5.4.3 Der ftDuino als Einstiegs-Arduino	69
6 Experimente	70
6.1 Lampen-Zeitschaltung	70
6.1.1 Sketch LampTimer	70
6.2 Not-Aus	72
6.2.1 Sketch EmergencyStop	72
6.3 Pulsweitenmodulation	75
6.3.1 Sketch Pwm	75
6.4 Schrittmotoransteuerung	79
6.4.1 Vollschrittsteuerung	81
6.4.2 Halbschrittsteuerung	82
6.5 Servomotoransteuerung	84
6.5.1 Externe 6-Volt-Versorgung	85
6.6 Die Eingänge des ftDuino	87

6.6.1	Spannungsmessung	87
6.6.2	Widerstandsmessung	87
6.6.3	Ein Eingang als Ausgang	88
6.7	Temperaturmessung	88
6.7.1	Sketch Temperature	89
6.8	Ausgänge an, aus oder nichts davon?	91
6.8.1	Sketch OnOffTristate	91
6.8.2	Leckströme	92
6.9	Aktive Motorbremse	92
6.10	USB-Tastatur	94
6.10.1	Sketch USB/KeyboardMessage	94
6.11	USB-GamePad	95
6.11.1	Sketch USB/GamePad	96
6.12	Entprellen	97
6.12.1	Sketch Debounce	97
6.13	Nutzung des I ² C-Bus	100
6.13.1	Sketch I2C/I2cScanner	101
6.13.2	MPU-6050-Sensor	101
6.13.3	OLED-Display	102
6.13.4	VL53L0X LIDAR-Distanzsensor	103
6.13.5	ftDuino als I ² C-Client und Kopplung zweier ftDuinos	104
6.13.6	ftDuino-I ² C-Expander	109
6.13.7	fischertechnik-Orientierungssensor	109
6.13.8	fischertechnik-Umweltsensor	110
6.13.9	Mini-I ² C-Servo-Adapter	112
6.14	WS2812B-Vollfarb-Leuchtdioden	114
6.14.1	Sketch WS2812FX	115
6.15	Musik aus dem ftDuino	115
6.15.1	Sketch Music	116
6.15.2	Sketch MusicPwm	116
6.16	Der ftDuino als MIDI-Instrument	117
6.16.1	Sketch MidiInstrument	117
6.17	Der ftDuino am Android-Smartphone	118
6.18	WebUSB: ftDuino via Webbrowser steuern	119
6.18.1	Chrome-Browser	119
6.18.2	WebUSB-Sketches	119
6.18.3	Console	120
6.18.4	Brickly-lite	121
6.18.5	Scratch 3.0	121
7	Modelle	123
7.1	Automation Robots: Hochregallager	123
7.2	ElectroPneumatic: Flipper	124
7.3	ROBOTICS TXT Explorer: Linienfolger	125
7.4	Idas Ampel	126
7.4.1	Zustandsautomaten	127
7.5	Klassischer 2D-Plotter	129
8	Community-Projekte	131
8.1	ftduino_direct: ftDuino-Anbindung per USB an TXT und TX-Pi	131
8.2	ftDuinIO: ftDuino-Kontroll-App für TXT und TX-Pi	132
8.3	Brickly-Plugin: Grafische ftDuino-Programmierung in Brickly	133
8.4	startIDE: Programmierung direkt auf dem TX-Pi oder TXT	134
8.5	ft-Extender: I ² C-Erweiterung	135
8.6	Scratch for Arduino (S4A)	135
8.6.1	Installation	136
8.6.2	Darstellung der Pin-Zuweisungen in S4A	137
8.7	Minecraft und ftDuino: Computerspiel trifft reale Welt	137

8.7.1	Installation der ftDuino -Mod	138
8.7.2	Vorbereitung des ftDuino	138
8.7.3	Verwendung des ftDuino in Minecraft	139
9	Bibliotheken	140
9.0.1	Port-Definitionen und Konstanten	140
9.1	FtduinoSimple	141
9.1.1	Verwendung im Sketch	141
9.1.2	bool input_get(uint8_t ch)	142
9.1.3	bool counter_get_state(uint8_t ch)	142
9.1.4	void output_set(uint8_t port, uint8_t mode)	143
9.1.5	void motor_set(uint8_t port, uint8_t mode)	143
9.1.6	Beispiel-Sketches	143
9.2	Ftduino	143
9.2.1	Die Eingänge I1 bis I8	144
9.2.2	void input_set_mode(uint8_t ch, uint8_t mode)	144
9.2.3	uint16_t input_get(uint8_t ch)	144
9.2.4	Die Ausgänge O1 bis O8 und M1 bis M4	145
9.2.5	void output_set(uint8_t port, uint8_t mode, uint8_t pwm)	145
9.2.6	void motor_set(uint8_t port, uint8_t mode, uint8_t pwm)	145
9.2.7	void motor_counter(uint8_t port, uint8_t mode, uint8_t pwm, uint16_t counter)	146
9.2.8	bool motor_counter_active(uint8_t port)	146
9.2.9	void motor_counter_set_brake(uint8_t port, bool on)	146
9.2.10	Die Zählereingänge C1 bis C4	147
9.2.11	void counter_set_mode(uint8_t ch, uint8_t mode)	147
9.2.12	uint16_t counter_get(uint8_t ch)	147
9.2.13	void counter_clear(uint8_t ch)	148
9.2.14	bool counter_get_state(uint8_t ch)	148
9.2.15	void ultrasonic_enable(bool ena)	148
9.2.16	int16_t ultrasonic_get()	148
9.3	Befehlsübersicht	149
10	Selbstbau	150
10.1	Erste Baustufe „Spannungsversorgung“	150
10.1.1	Bauteile-Polarität	151
10.1.2	Kontrollmessungen	151
10.2	Zweite Baustufe „Mikrocontroller“	152
10.2.1	Funktionstest des Mikrocontrollers	152
10.3	Dritte Baustufe „Eingänge“	153
10.4	Vierte Baustufe „Ausgänge“	154
10.4.1	Ausgangstests mit 5 Volt	154
10.4.2	Platinenhistorie	155
A	Schaltplan	156
B	Platinenlayout	157
C	Bestückungsplan	158
D	Maße	159
E	Gehäuse	160

Kapitel 1

Einleitung

Elektronik- und Computermodule für Konstruktionsbaukästen gibt es seit den Anfängen der privat genutzten Heimcomputer der 80er Jahre. Diese Module verfügten über wenig eigene Intelligenz und waren vor allem für die Signalanpassung zwischen dem Heimcomputer und den Motoren und Schaltern der Baukastensysteme zuständig, weshalb diese Module in der Regel als "Interfaces" bezeichnet wurden, also als Schnittstelle zwischen Computer und Modell.

Über die Jahre stieg die Leistungsfähigkeit der Heimcomputer und auch die Elektronik-Module lernten dazu. Vor allem wurden aus "Interfaces" über die Zeit "Controller". Aus den weitgehend passiven Schnittstellen wurden Bausteine mit eigener Intelligenz, die den Heimcomputer bzw. später den PC nur noch zur Programmierung benötigten. Einmal programmiert konnten diese Controller das Modell auch eigenständig bedienen. Dazu wurden die auf dem PC entwickelten Programmdaten auf den Controller geladen und dort gespeichert.

Die heutigen Controller von Lego oder fischertechnik sind selbst leistungsfähige Computer. Um deren Komplexität für den Endanwender benutzbar zu machen verborgen die Hersteller die Details der elektronischen Komponenten sowie der auf den Geräten laufenden Software hinter gefälligen Benutzeroberflächen. Leider verpassen solche Systeme auf diese Weise die Chance, Wissen über Aufbau und Funktion derartiger Controller zu vermitteln. Während sich die Hersteller gegenseitig darin übertreffen, komplexe mechanische Getriebe im Wortsinne begreifbar zu machen stellen sich die dazugehörigen Controller für den Anwender als undurchsichtige Bausteine dar.

Parallel hat sich seit der Jahrtausendwende die sogenannte Maker-Bewegung entwickelt, die den "Selbstmach"-Gedanken in den Bereich der Elektronikentwicklung trägt. Systeme wie der Raspberry-Pi und der Arduino laden dazu ein, alle technischen Details dieser komplett zugänglichen und dokumentierten Controller zu erforschen und eigene Entwicklungen zu betreiben. Große Communities bieten umfangreiches Know-How und stellen Plattformen zum Wissensaustausch zur Verfügung. Im Gegensatz zu den Controllern von fischertechnik und Lego steht hier das Innere des Controllers im Vordergrund. Allerdings erfordert der Einsatz dieser Controller oft einiges an handwerklichem Geschick beim Aufbau der Elektronik selbst sowie speziell bei Robotik-Projekten bei der Umsetzung von mechanischen Komponenten.

1.1 Das **ftDuino**-Konzept

Die Idee hinter dem **ftDuino** ist es, die Brücke zwischen zwei Welten zu schlagen. Auf der einen Seite integriert er sich mechanisch und elektrisch nahtlos in die Robotics-Serie der fischertechnik-Konstruktionsbaukästen. Auf der anderen Seite fügt er sich perfekt in das Arduino-Ökosystem zur Software-Entwicklung von eingebetteten Systemen ein.

1.1.1 Das fischertechnik-Baukastensystem

Fischertechnik ist ein technikorientiertes Konstruktionsspielzeug. Der Schwerpunkt liegt auf Mechanik, Elektromechanik, Elektronik und zunehmend auch Robotik und der dafür nötigen Integration von informationsverarbeitenden Komponenten.

Fischertechnik selbst entwickelt und vertreibt seit den frühen 80er Jahren Elektronik-Module, die eine Verbindung zwischen Computer und mechanischem Modell ermöglichen bzw. über eigene Intelligenz verfügen. Die dabei zum Einsatz kommenden Steckverbinder sowie die Sensoren (Taster, Schalter, Lichtsensoren, ...) und Aktoren (Lampen, Motoren, Ventile, ...) sind über die Jahre zueinander kompatibel geblieben und lassen sich nach wie vor beliebig miteinander kombinieren.



Abbildung 1.1: ftDuino

Die letzten zwei Controller-Generationen (fischertechnik TX- und TXT-Controller) haben eine vergleichbare mechanische Größe und verfügen über eine vergleichbare Anzahl und Art von Anschlüssen zur Verbindung mit dem Modell. Die Modelle aller aktuellen Robotics-Baukästen sind auf diese Anschlüsse ausgelegt und untereinander kombinierbar.



Abbildung 1.2: Original-Controller von fischertechnik

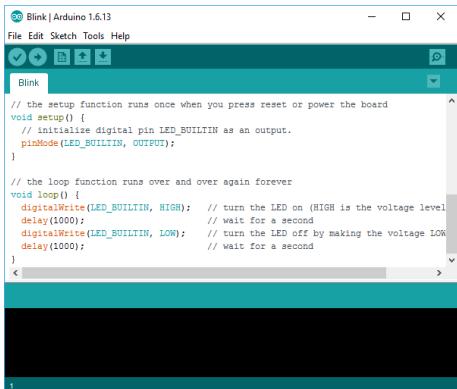
Beide Original-Controller verfügen über acht analoge Eingänge, acht analoge Ausgänge, vier schnelle Zählereingänge und einen I²C-Erweiterungsanschluss.

Fischertechnik selbst vertreibt die PC-Software RoboPro zur visuellen Softwareentwicklung für die hauseigenen Controller. Der Einstieg in RoboPro ist relativ einfach und spricht bereits Kinder an. Die Grenzen von RoboPro sind aber schnell erreicht, wenn es um praxisnahe und inhaltlich anspruchsvolle Projekte in weiterführenden Schulen, Universitäten und der Berufsausbildung geht. In diesen Bereichen haben sich Systeme wie die Arduino-Plattform etabliert.

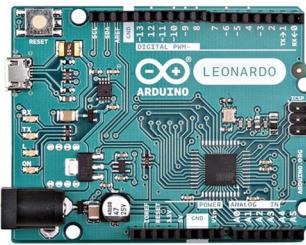
1.1.2 Das Arduino-System

Das Arduino-Ökosystem hat sich in den letzten Jahren zum De-Facto-Standard für den Einstieg und die semiprofessionelle Entwicklung und Programmierung von eingebetteten Systemen etabliert. Eingebettete Systeme sind in der Regel mechanisch kleine Computer und informationsverarbeitende Module, die innerhalb einer Maschine Steuer- und Regelaufgaben übernehmen und immer häufiger auch mit der Außenwelt kommunizieren.

Die Arduino-IDE ist eine übersichtliche und leicht zu bedienende Programmieroberfläche, die sich auf Windows-, Linux-



(a) Arduino-Entwicklungsumgebung (IDE)



(b) Arduino-Leonardo-Controller

Abbildung 1.3: Die Arduino-Entwicklungsumgebung und -Controller

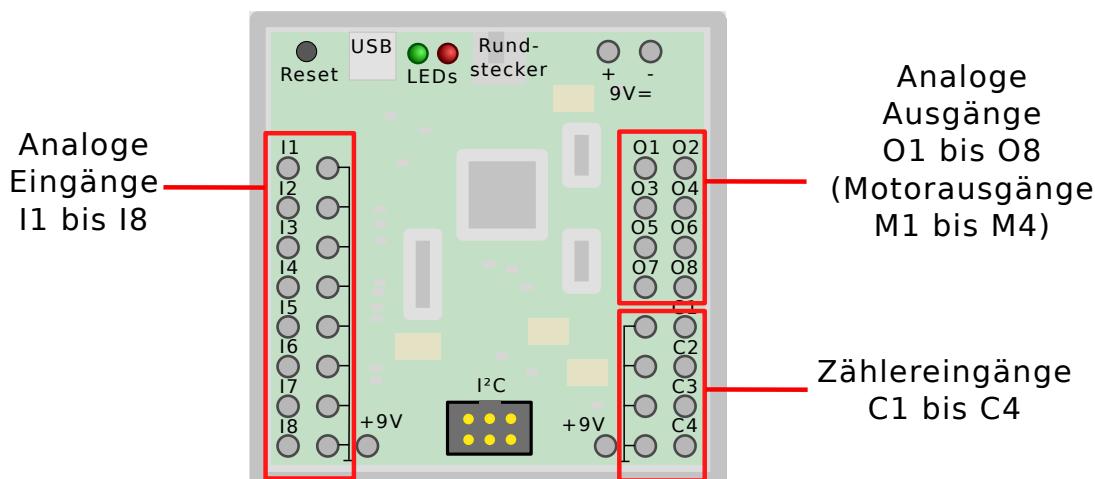
und Apple-PCs nutzen lässt. Die zu programmierenden Zielgeräte wie zum Beispiel der Arduino-Leonardo sind kleine und kostengünstige Platinen, die per USB mit dem PC verbunden werden. Sie kommen üblicherweise ohne Gehäuse und stellen über Steckverbinder eine Vielzahl von Signalleitungen zum Anschluss von Sensoren und Aktoren zur Verfügung. Typische mit der Arduino-Plattform zu erledigende Aufgaben sind einfache Messwerterfassungen (Temperatur-logging, ...) und Steueraufgaben (Jalousiesteuerungen, ...).

Programme, die mit der Arduino-IDE geschrieben wurden, werden in der Arduino-Welt als sogenannte "Sketches" bezeichnet. Mit Hilfe der Arduino-IDE können passende Sketches für den *ftDuino* geschrieben und über das USB-Kabel direkt auf das Gerät hinuntergeladen werden.

Auch für einfache Robotik-Experimente ist die Arduino-Plattform bestens geeignet. Schwieriger ist oft eine mechanisch befriedigende Umsetzung selbst einfachster Robotik-Projekte. Diese Lücke kann das fischertechnik-System schließen.

1.2 Der *ftDuino*-Controller

Der *ftDuino*-Controller wurde bewusst mechanisch und elektrisch an den TX- und den TXT-Controller angelehnt, um ihn ebenfalls direkt mit den aktuellen Robotics-Kästen kombinieren zu können. Gleichzeitig wurde er softwareseitig mit dem Arduino-System kompatibel gehalten.

Abbildung 1.4: Die Anschlüsse des *ftDuino*

1.2.1 Mikrocontroller

Das Herz des **ftDuino** ist ein Mikrocontroller des Typs ATmega32u4. Dieser Mikrocontroller wird von Microchip (ehemals Atmel) hergestellt und findet auch im Arduino-Leonardo Verwendung. Sketches, die für den Leonardo übersetzt wurden, sind oft direkt auf dem **ftDuino** lauffähig.

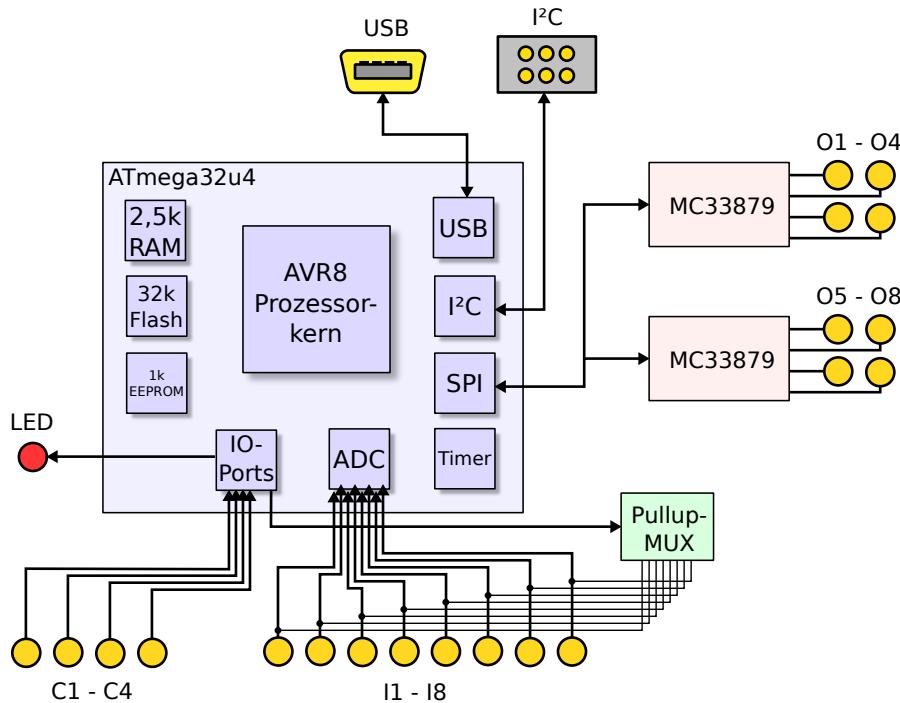


Abbildung 1.5: Blockdiagramm des **ftDuino**

Der ATmega32u4-Controller ist ein Mitglied der sogenannten AVR-Familie, auf der die meisten Arduino-Bords basieren. Die AVR-Controller sind klein, günstig und benötigen zum Betrieb nur wenig weitere Bauteile. Ihr Speicher und ihre Rechenleistung reicht für den Betrieb sämtlicher fischertechnik-Modelle der Roboticsreihe deutlich aus.

Der ATmega32u4 verfügt über 32 Kilobytes nicht-flüchtigem Flash-Speicher, der als Sketch-Programmspeicher verwendet wird sowie 2,5 Kilobytes internem RAM-Speicher zur Datenspeicherung. Der Prozessortakt beträgt 16 Megahertz. Jeweils ein Sketch kann im Flash-Speicher permanent gespeichert werden und bleibt auch erhalten wenn der **ftDuino** von der Spannungsversorgung getrennt wird.

Der ATmega32u4 ist eines der wenigen Mitglieder der AVR-Familie, das direkte USB-Unterstützung bereits auf dem Chip mitbringt. Auf diese Weise ist der **ftDuino** sehr flexibel als USB-Gerät am PC einsetzbar.

Bootloader

Der **ftDuino** wird mit einem im ATmega32u4 vorinstallierten sogenannten Caterina-Bootloader ausgeliefert. Dieses Programm belegt permanent vier der 32 Kilobytes Flash-Speicher des ATmega32u4 und kann nicht ohne weiteres gelöscht oder verändert werden.

Der Bootloader ermöglicht die Kommunikation mit dem PC und erlaubt es, dass der PC Programmdaten in den verliebenden 28 Kilobytes Flash-Speicher ablegen bzw. austauschen kann. Der Bootloader ermöglicht auf diese Weise das Hinunterladen von Sketches in den **ftDuino**.

Dass der Bootloader aktiv ist und nicht etwa gerade ein Sketch ausgeführt wird, ist am Zustand der internen LEDs erkennbar (siehe 1.2.4).

1.2.2 USB-Anschluss

Die Verbindung zum PC zur Programmierung und Datenübertragung wird über USB hergestellt. Der *ftDuino* verfügt über eine sogenannte Mini-USB-Buchse und wird über ein handelsübliches Mini-USB-Kabel mit dem PC verbunden.

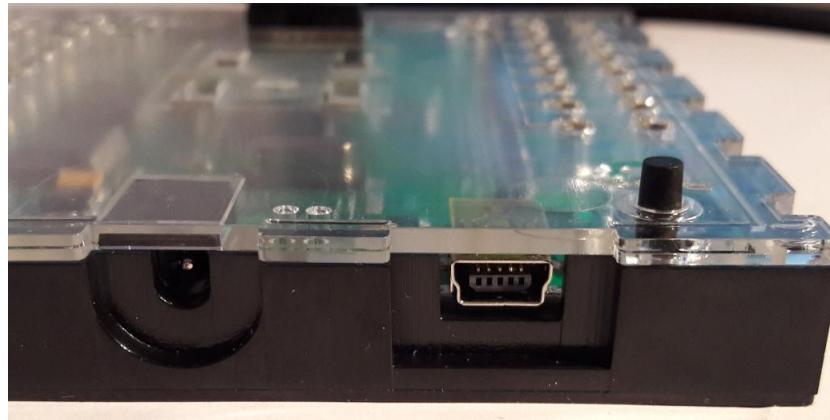


Abbildung 1.6: Strom- und USB-Anschluss des *ftDuino*

1.2.3 Reset-Taster

Normalerweise kann die Arduino-IDE durch entsprechende Kommandos über den USB-Anschluss den Bootloader des *ftDuino* aktivieren, um einen neuen Sketch hinunterzuladen. Enthält ein hinuntergeladener Sketch aber Fehler, die eine normale Programmausführung verhindern, dann kann es passieren, dass die USB-Kommunikation während der normalen Programmausführung nicht funktioniert und die Arduino-IDE den *ftDuino* von sich aus nicht mehr ansprechen kann.

Für diesen Fall verfügt der *ftDuino* über einen Reset-Taster. Wird dieser gedrückt, dann wird der Bootloader zwangsweise aktiviert und die LEDs zeigen entsprechend den Start des Bootloaders an.

Ein mit einem fehlerhaften Sketch versehener *ftDuino* kann daher problemlos mit einem korrigierten Sketch versehen werden, indem kurz vor dem Hinunterladen der Reset-Taster kurz gedrückt wird. Mehr Details dazu finden sich im Abschnitt 1.3.

1.2.4 Interne LEDs

Der *ftDuino* verfügt über je eine grüne und rote interne Leuchtdiode (LED). Die grüne Spannungsversorungs-LED zeigt an, dass der interne 5-Volt-Zweig mit Spannung versorgt ist und der Mikrocontroller des *ftDuino* versorgt wird.

Die rote LED steht für eigene Verwendung zur Verfügung und kann vom Anwender aus eigenen Sketches heraus unter der Bezeichnung `LED_BUILTIN` angesprochen werden (siehe Abschnitt 3.1).

Die rote LED wird auch vom Caterina-Bootloader des *ftDuino* verwendet. Ist der Bootloader aktiv, so leuchtet die LED im Sekundentakt sanft heller und dunkler ("fading").

1.2.5 Spannungsversorgung

Der *ftDuino* kann auf vier Arten mit Spannung versorgt werden:

USB Über USB wird der *ftDuino* immer dann versorgt, wenn keine weitere Stromversorgung angeschlossen ist. Die USB-Versorgung reicht allerdings nicht zum Betrieb der Analogausgänge. Lediglich die Eingänge können bei USB-Versorgung verwendet werden. Zusätzlich ist die Genauigkeit einer Widerstandsmessung an den Analogeingängen deutlich herabgesetzt (siehe 1.2.6).



Abbildung 1.7: Für den ftDuino empfohlene Original-fischertechnik-Stromversorgungen

Hohlstecker Wird der ftDuino per Hohlstecker z.B. durch das fischertechnik Power Netzgerät 505287¹ oder dem Netzteil aus dem fischertechnik Power-Set 505283² mit 9 Volt versorgt, so wird der gesamte ftDuino daraus versorgt und der USB-Anschluss wird nicht belastet. Die Analogausgänge sind in diesem Fall benutzbar und die Widerstandsmessung an den Analogeingängen erfolgt mit voller Genauigkeit. Für den Einsatz von Fremdnetzgeräten bietet fischertechnik unter der Artikelnummer 134863³ einen Adapter von üblichen 5mm-Hohlsteckern auf den von fischertechnik verwendeten 3,45mm-Stecker an.

9V=-Eingang Eine Versorgung des ftDuino z.B. per Batterie-Set oder mit dem Akku aus dem Akku-Set 34969⁴ entspricht der Versorgung per Hohlstecker. Wird der ftDuino sowohl über den 9V=-Eingang als auch per Hohlstecker versorgt, dann erfolgt die Versorgung aus der Quelle, die die höhere Spannung liefert. Eine Rückspeisung in den Akku oder eine Ladung des Akkus findet nicht statt.

I²C Über den I²C-Anschluss versorgt der ftDuino in erster Linie andere angeschlossene Geräte wie kleine Displays oder Sensoren. Es ist aber auch möglich, ihn selbst über diesen Anschluss zu versorgen. Es bestehen dabei die gleichen Beschränkungen wie bei der Versorgung über USB. Auf diese Weise ist zum Beispiel die Versorgung zweier gekoppelter ftDuinos aus einer einzigen Quelle möglich (siehe Abschnitt 6.13.5).

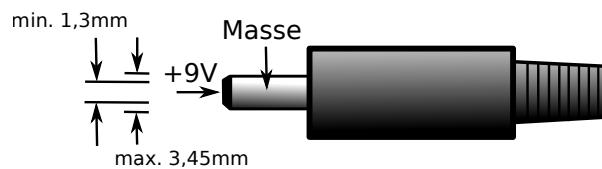


Abbildung 1.8: 3,45mm fischertechnik-Hohlstecker

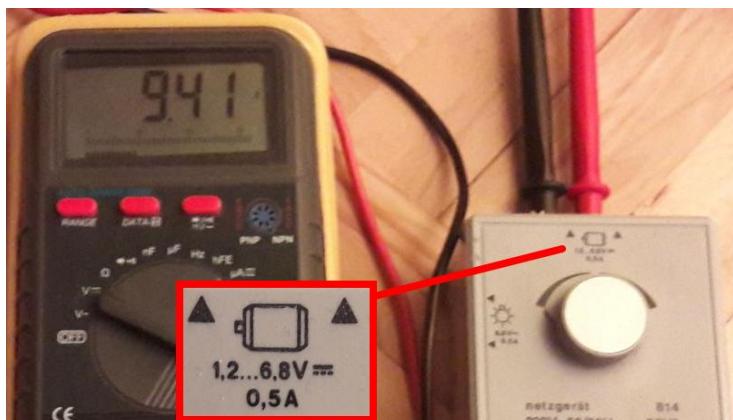
Vorsicht ist bei der Verwendung unbekannter oder sehr alter Spannungsquellen geboten. Oftmals weichen die aufgedruckten Nennspannungen weit von der Realität ab. Das in Abbildung 1.9 abgebildete Netzteil liefert am 6,8-Volt-Ausgang eine Leerlaufspannung von über 27 Volt. Ein einfaches Multimeter zeigt noch moderate 9,4 Volt an und könnte den Eindruck erwecken, dass sich dieses Netzteil zum Betrieb des ftDuino eignet. Erst das Oszilloskop bringt den genauen Spannungsverlauf zu Tage und zeigt, dass die Spannung kurzfristig sogar 27,2 Volt erreicht. Während Ein- und Ausschaltvorgängen können noch wesentlich höhere Spannungen auftreten und den ftDuino beschädigen.

¹fischertechnik-Datenbank: <https://ft-datenbank.de/tickets?fulltext=505287>

²fischertechnik-Datenbank: <https://ft-datenbank.de/tickets?fulltext=505283>

³fischertechnik-Datenbank: <https://ft-datenbank.de/tickets?fulltext=134863>

⁴fischertechnik-Datenbank: <https://ft-datenbank.de/tickets?fulltext=34969>



(a) Das Multimeter zeigt gute 9 Volt an



(b) Das Oszilloskop zeigt Spitzen von über 27 Volt

Abbildung 1.9: Vorsicht: Ein alter fischertechnik-Trafo liefert über 27V am 6,8-Volt-Ausgang und ist für den *ftDuino* ungeeignet

Aus diesem Grund sollte man bei Einsatz solcher alten oder unbekannten Spannungsquellen sehr vorsichtig sein und im Zweifelsfall auf den Einsatz verzichten.

Abbildung 1.10: Alte und für den *ftDuino* ungeeignete Stromversorgungen

Im Zweifel sollte unbedingt eine aktuelle Spannungsversorgung von fischertechnik eingesetzt werden. Das aktuelle Fischertechnik Power Netzgerät 9V 50528⁵ ist bestens geeignet, ebenso wie der Akku aus dem Akku-Set 34969⁶ oder ein 9-Volt-Block im Batteriehalter.

Soll es unbedingt ein Fremdgerät sein, so ist auf eine stabilisierte 9Volt-Spannung zu achten. Die Stromstärke sollte 1,5 Ampere nicht unterschreiten, um auch kräftige Motoren betreiben zu können. Ein Beispiel das in Abbildung 1.11 dargestellte Universal-Schaltnetzteil aus dem Reichelt-Onlineversand⁷.

⁵fischertechnik-Datenbank: <https://ft-datenbank.de/tickets?fulltext=505287>

⁶fischertechnik-Datenbank: <https://ft-datenbank.de/tickets?fulltext=34969>

⁷Reichelt MW 3R15GS <https://www.reichelt.de/universal-schaltnetzteil-18-w-3-12-v-1500-ma-mw-3r15gs-p87340.html>



Abbildung 1.11: Für den ftDuino geeignetes Universalnetzteil aus dem Onlineversand

1.2.6 Anschlüsse

Die Anschlüsse des ftDuino teilen sich in die fischertechnik-kompatiblen Ein- und Ausgänge auf, die für die üblichen 2,6mm-Einzelstecker geeignet sind, sowie die üblichen Steckverbinder aus dem Computerbereich. Die fischertechnik-kompatiblen Ein- und Ausgänge sind identisch zum fischertechnik-TXT-Controller angeordnet. Verdrahtungsschemata für den TXT können daher in der Regel direkt übernommen werden.

Analoge Eingänge

Der ftDuino verfügt über acht analoge Eingänge I1 bis I8, über die Spannungen von 0 bis 10 Volt sowie Widerstände von 0 bis über 10 Kiloohm erfasst werden können.

Die Eingänge sind über hochohmige Serienwiderstände gegen Kurzschlüsse sowie Über- und Unterspannung abgesichert.

Jeder Eingang ist mit einem eigenen Analogeingang des ATmega32u4-Mikrocontrollers verbunden. Die Analogwerterfassung kann mit bis zu 10 Bit Auflösung erfolgen (entsprechend einem Wertebereich 0 bis 1023) und wird direkt in der Hardware des Mikrocontrollers durchgeführt.

Ein Spannungsteiler erweitert den Eingangsspannungsbereich des Mikrocontrollers von 0 bis 5 Volt auf den bei fischertechnik genutzten Bereich von 0 bis 10 Volt. Alle an fischertechnik-Modellen auftretenden Spannungen können damit erfasst werden.

Zur Widerstandsmessung kann jeder Eingang ftDuino-intern mit einem Widerstand gegen 5 Volt verschaltet werden. Dieser Widerstand wirkt mit einem externen Widerstand als Spannungsteiler und aus der am Mikrocontroller gemessenen Spannung kann der Wert des extern angeschlossenen Widerstands gemessen werden. Alle von fischertechnik-Modellen üblicherweise verwendeten Widerstände können so erfasst werden.

Die analogen Eingänge sind nicht auf eine externe 9-Volt-Versorgung angewiesen, sondern funktionieren auch bei der Stromversorgung über den USB-Anschluss des PC. Allerdings sinkt in diesem Fall die Genauigkeit der Widerstandsmessung signifikant.

Analoge Ausgänge

Der ftDuino verfügt über acht analoge Ausgänge 01 bis 08. Diese Ausgänge werden über zwei spezielle Treiberbausteine im ftDuino angesteuert. Die Treiberbausteine können jeden der acht Ausgänge unabhängig steuern. Sie sind identisch zu denen,

die fischertechnik in den TX- und TXT-Controllern einsetzt. Die Ausgänge sind daher kompatibel zu allen fischertechnik-Motoren und -Aktoren, die auch am TX- und TXT-Controller betrieben werden können. Der maximal pro Ausgang verfügbare Strom beträgt 600mA bis 1,2A.

Die Ausgänge sind bei einer reinen USB-Stromversorgung des *ftDuino* nicht verfügbar.

Der verwendete Treiberbaustein MC33879 ist kurzschlussfest und robust gegen Über- und Unterspannung an den Ausgängen.

Alle acht Ausgänge können unabhängig voneinander gegen Masse oder Eingangsspannung sowie hochohmig geschaltet werden. Je zwei Einzelausgänge können zu einem Motorausgang kombiniert werden. Die Einzelausgänge 01 und 02 bilden dabei den Motorausgang M1, 03 und 04 bilden M2 und so weiter.

Die Analogwerte an den Ausgängen werden durch eine sogenannte Pulsweitenmodulation (PWM) erzeugt. Dabei werden die Ausgänge kontinuierlich schnell ein- und ausgeschaltet, so dass Motoren, Lampen und andere träge Verbraucher dem Signal nicht folgen können, sondern sich entsprechend des Mittelwerts verhalten. Dieses Verfahren wird in gleicher Weise auch im TX- und TXT-Controller angewendet.

Beide MC33879 werden vom Mikrocontroller des *ftDuino* intern über dessen sogenannte SPI-Schnittstelle angeschlossen. Da dadurch die speziellen PWM-Ausgänge des Mikrocontrollers nicht zur Erzeugung der Pulsweitenmodulation herangezogen werden können muss das PWM-Signal durch den Sketch bzw. die verwendeten Software-Bibliotheken (siehe Kapitel 9) selbst erzeugt werden. Die sogenannte PWM-Frequenz wird dabei durch den verwendeten Sketch bestimmt und kann beliebig variiert werden.

Mehr Informationen zum Thema PWM finden sich in Abschnitt 6.3.

Zählereingänge

Der *ftDuino* verfügt über vier spezielle Zählereingänge C1 bis C4. Diese Eingänge können rein digitale Signale erfassen und mit hoher Geschwindigkeit Ereignisse auswerten. Die maximal erfassbare Signalrate liegt je nach Sketch bei mehreren 10.000 Ereignissen pro Sekunde.

Die Zählereingänge sind kompatibel zu den Encodern der fischertechnik-Encoder-Motoren und können unter anderem zur Drehwinkelauflösung sowie zur Drehzahlbestimmung herangezogen werden.

Zählereingang C1 verfügt zusätzlich über die Möglichkeit, einen fischertechnik ROBO TX Ultraschall-Distanzsensor 133009⁸ anzuschließen.

Hinweis: Es gibt zusätzlich zum hier beschriebenen Ultraschallsensor mit dreiaddrigem Anschlusskabel einen sehr alten Sensor mit vierpoligem Kabel. Dieser sehr alte Sensor seit langem nicht mehr erhältliche Sensor ist zum *ftDuino* nicht kompatibel (und auch zu keinem der aktuellen Original-fischertechnik-Controller).

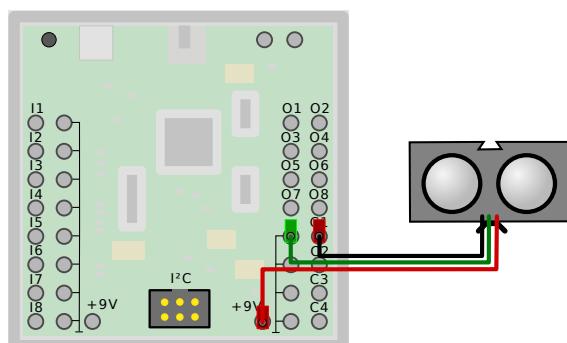


Abbildung 1.12: Anschluss des Ultraschallsensors 133009

⁸fischertechnik-Datenbank: <https://ft-datenbank.de/tickets?fulltext=133009>

I²C-Anschluss

Der I²C-Anschluss ist elektrisch und mechanisch zu dem des fischertechnik-TX-Controllers kompatibel. Der dort aus dem Gerät herausgeführte sogenannte I²C-Bus findet auch im Arduino-Umfeld häufige Verwendung und erlaubt den Anschluss passender Elektronikkomponenten wie Sensoren, Analog-Digital-Wandler, Displays und ähnlich. Außerdem ist über den I²C-Bus eine Kopplung mehrerer ftDuinos möglich sowie die Kopplung des ftDuino mit dem TX-Controller und dem TXT-Controller wie in Abschnitt 6.13 beschrieben.

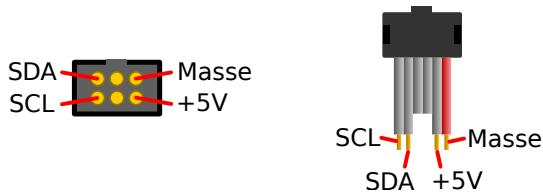


Abbildung 1.13: Buchsen- und Kabelbelegung des I²C-Bus am ftDuino

Die Signale auf dem I²C-Anschluss nutzen wie am TX-Controller einen 5-Volt-Pegel. Zusätzlich werden aus der Spannungsversorgung des ftDuino 5 Volt zur Versorgung angeschlossener Komponenten bereitgestellt. Aus dem 5 Volt-Ausgang dürfen maximal 100mA entnommen werden, um die ftDuino-interne Spannungsversorgung nicht zu überlasten

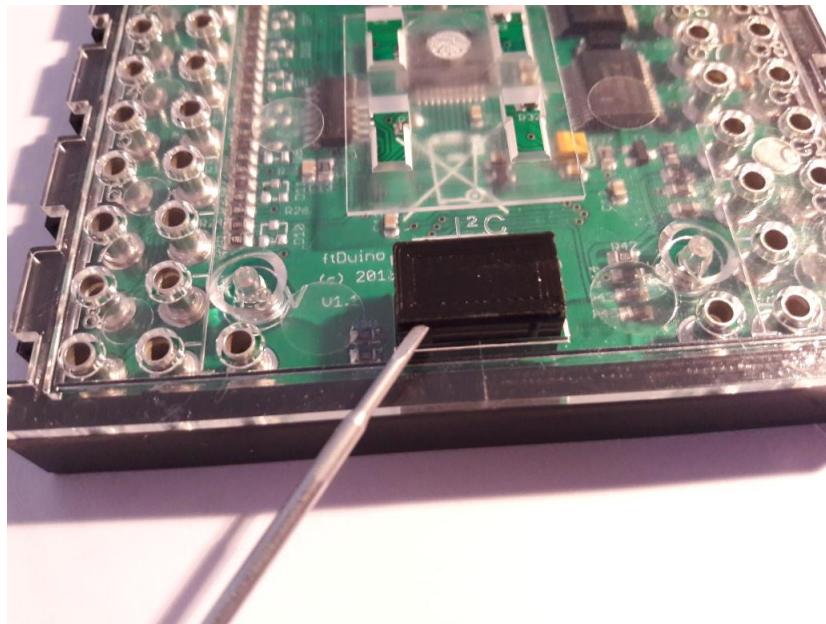


Abbildung 1.14: Entfernen der Schutzkappe vom I²C-Anschluss des ftDuino

Achtung! Der fischertechnik-TXT-Controller sowie für den Betrieb am TXT vorgesehene Komponenten sind aufgrund dessen 3,3 Volt-Signal-Pegel nicht direkt mit dem ftDuino kompatibel. Eine direkte Verbindung zwischen TXT und ftDuino kann den TXT beschädigen. Sollen der TXT oder für den Betrieb am TXT vorgesehene Komponenten am ftDuino verwendet werden, so sind unbedingt passende I²C-Pegelanpassungen zwischenzuschalten wie in Abschnitt 6.13.5 beschrieben.

Achtung! Die auf dem I²C-Anschluss liegenden Signale sind direkt und ungeschützt mit dem Mikrocontroller des ftDuino bzw. mit dessen Spannungsversorgung verbunden. Werden an diesem Anschluss Kurzschlüsse verursacht oder Spannungen über 5V angelegt, dann kann der ftDuino zerstört werden. Der I²C-Anschluss sollte daher nur von erfahrenen Anwendern verwendet werden. Aus diesem Grund wird der ftDuino mit einer Schutzkappe auf dem I²C-Anschluss vertrieben. Diese Kappe ist bei Bedarf vorsichtig mit einem flachen Schraubendreher zu entfernen.

1.2.7 Variante mit internem OLED-Display

Es gibt Varianten des *ftDuino*, die bereits über ein eingebautes OLED-Display verfügen. Das Display hat eine Auflösung von 128 * 32 Pixel und ist intern am I²C-Bus angeschlossen.

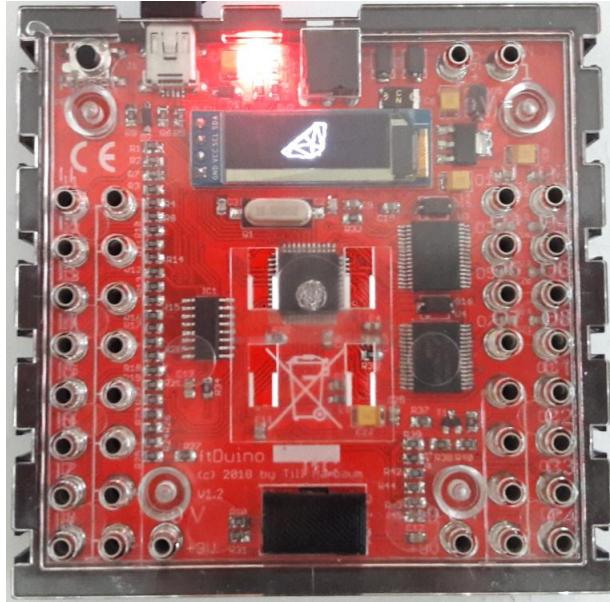


Abbildung 1.15: Raumschiffanimation auf dem intenen OLED des *ftDuino*

Der OLED-*ftDuino* verfügt über einen angepassten Bootloader, der direkt nach dem Einschalten das Display initialisiert und einen *ftDuino*-Schriftzug einblendet. Da der Bootloader das Display aktiv anspricht bildet der OLED-*ftDuino* immer einen I²C-Busmaster. Ein *ftDuino* mit eingebautem Display eignet sich daher nur sehr eingeschränkt dafür, selbst als I²C-Client zu arbeiten und selbst von einem anderen I²C-Master angesprochen zu werden. Er kann jedoch selbst uneingeschränkt als Master arbeiten und z.B. einen weiteren Display-losen *ftDuino* am I²C ansprechen. Zusätzliche externe I²C-Geräte lassen sich wie gehabt anschließen.

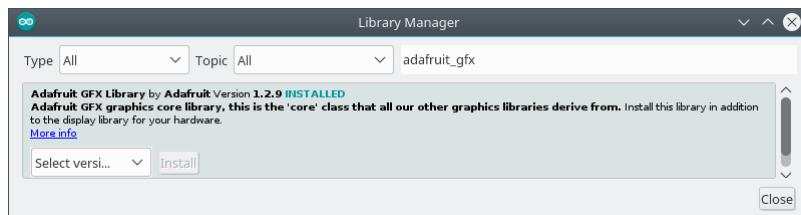


Abbildung 1.16: Die Adafruit-GPX-Bibliothek im Bibliotheksmanager der Arduino-IDE

Die *ftDuino*-Installation bringt unter `Datei > Beispiele > Ftduino > InternalOLED` mehrere Beispiele mit, die jeweils über eigene Varianten der `FtduinoDisplay.cpp`-Bibliothek verfügen. Alle Beispiele benötigen zusätzlich die über den Bibliotheks-Manager der Arduino-IDE mit wenigen Klicks zu installierende "Adafruit GFX Library".

Das Beispiel `Datei > Beispiele > Ftduino > InternalOLED > Ship3D` bringt eine einfache und schnelle Variante dieser Bibliothek mit. Sie sollte immer dann verwendet werden, wenn keine weiteren I²C-Geräte am *ftDuino* betrieben werden und es auf einen schnellen Bildaufbau ankommt.

Das Beispiel `Datei > Beispiele > Ftduino > InternalOLED > Ship3DWire` dagegen basiert auf der Arduino-Wire-Bibliothek und der Bildaufbau ist hier deutlich langsamer. Dafür wird zum Zugriff auf den I²C-Bus die Wire-Bibliothek verwendet und ein Betrieb zusammen mit anderen ebenfalls durch die Wire-Bibliothek angesteuerten I²C-Sensoren ist möglich. Diese Variante der `FtduinoDisplay.cpp`-Bibliothek kommt auch dann zum Einsatz, wenn am OLED-*ftDuino* weitere *ftDuinos* über I²C zur Bereitstellung zusätzlicher Ein- und Ausgänge angeschlossen sind.

Das interne OLED-Display belegt die Adresse 0x3C (dezimal 60) und kann daher nicht ohne weiteres parallel mit anderen OLED-Displays unter dieser Adresse betrieben werden.

1.2.8 Hinweise für Arduino-erfahrene Nutzer

Es gibt ein paar fundamentale Unterschiede zwischen dem klassischen Arduino und dem **ftDuino**. In erster Linie sind dies die Schutz- und Treiberschaltungen, die beim **ftDuino** für die fischertechnik-Kompatibilität der Anschlüsse sorgt. Diese Schaltungen sind der Grund, warum man die Ein- und Ausgänge des **ftDuino** nicht mit den Arduino-üblichen `pinMode()` und `digitalWrite()`-Funktionen ansprechend kann. Diese Funktionen sind darauf ausgelegt, direkt Anschlüsse des ATmega32u4-Mikrocontrollers zu steuern und berücksichtigen nicht, dass der **ftDuino** zusätzliche Schaltungen beinhaltet.

Aus diesem Grund werden die fischertechnik-kompatiblen Ein- und Ausgänge des **ftDuino** über eigene Bibliotheken angesteuert, wie in Kapitel 9 beschrieben.

Erfahrene Nutzer können unter Umgehung dieser Bibliotheken nach wie vor auch direkt mit der Hardware des **ftDuino** kommunizieren. Die Schaltpläne im Anhang A liefern alle dafür nötige Information.

1.3 Problemlösungen

1.3.1 Die grüne Leuchtdiode im **ftDuino** leuchtet nicht

Zunächst sollte der **ftDuino** von allen Verbindungen getrennt und ausschließlich über den USB-Anschluss mit dem PC verbunden werden. Die grüne Leuchtdiode im **ftDuino** muss sofort aufleuchten. Tut sie das nicht, dann sollte ein anderer PC bzw. ein anderer USB-Anschluss probiert werden.

Hilft das nicht, dann ist zunächst das USB-Kabel zu prüfen. Funktionieren andere Geräte an diesem Kabel? Gegebenenfalls muss das Kabel ausgetauscht werden.

1.3.2 Der **ftDuino** taucht am PC nicht als COM:-Port auf

Der **ftDuino** wird nicht mehr vom PC erkannt und es wird kein COM:-Port angelegt.

Leuchtet die grüne Leuchtdiode am **ftDuino**? Falls nicht sollte wie unter 1.3.1 verfahren werden.

Leuchtet die grüne Leuchtdiode, dann sollte ein kurzer Druck auf den Reset-Taster (siehe 1.2.3) den Bootloader des **ftDuino** für einige Sekunden aktivieren. Erkennbar ist dies am langsamem Ein- und Ausblenden der roten Leuchtdiode wie in Abschnitt 1.2.4 beschrieben. In dieser Zeit sollte der **ftDuino** vom PC erkannt werden. Dies wird u.a. unter Windows im Gerätemanager wie im Abschnitt 2.1.3 beschrieben angezeigt.

Wird der **ftDuino** nach einem Reset erkannt, aber verschwindet nach ein paar Sekunden aus der Ansicht des Gerätmanagers oder wird als unbekanntes Gerät angezeigt, dann wurde wahrscheinlich ein fehlerhafter Sketch auf den **ftDuino** geladen und die Arduino-IDE ist nicht in der Lage, sich eigenständig mit dem **ftDuino** zu verbinden. In diesem Fall sollte man das Blink-Beispiel (siehe Abschnitt 3.1) in der Arduino-IDE öffnen, den **ftDuino** per kurzem Druck auf den Reset-Taster in den Bootloader-Modus versetzen und direkt danach die Download-Schaltfläche in der Arduino-IDE drücken. Sobald der funktionierende Sketch geladen wurde wird der **ftDuino** auch ohne manuelle Druck auf den Reset-Taster wieder von PC erkannt und der entsprechende COM:-Port taucht wieder auf.

Der **ftDuino** bleibt nur wenige Sekunden im Bootloader und kehrt danach in den normalen Sketch-Betrieb zurück. Zwischen dem Druck auf den Reset-Knopf und dem Start des Downloads aus der Arduino-IDE sollte daher möglichst wenig Zeit vergehen.

1.3.3 Der **ftDuino** funktioniert, aber die Ausgänge nicht

Um die Ausgänge zu benutzen muss der **ftDuino** mit einer 9-Volt-Spannungsquelle entweder über den Hohlstecker-Anschluss oder über die üblichen fischertechnik-Stecker verbunden sein. Verfügt der **ftDuino** über keine ausreichende 9-Volt-Versorgung, so können die Ausgänge nicht betrieben werden. Da der **ftDuino** selbst schon mit geringerer Spannung läuft ist dessen Funktion kein sicheres Indiz dafür, dass eine ausreichende 9-Volt-Versorgung vorhanden ist.

Ist der **ftDuino** über USB mit dem PC verbunden, dann versorgt er sich bei mangelhafter oder fehlender 9-Volt-Versorgung von dort. Geht der **ftDuino** ganz aus, sobald man die USB-Verbindung trennt, dann ist keine 9-Volt-Versorgung gegeben

und es muss sichergestellt werden, dass Polarität und Spannung korrekt bzw. ausreichend sind. Gegebenenfalls muss die Batterie ausgetauscht oder der verwendete Akku geladen werden.

1.3.4 Der ftDuino lässt sich nicht flashen

Es kommt vor, dass der ftDuino zwar vom PC (zeitweise) erkannt wird, sich aber einfach nicht flashen lässt. Die Ursachen dafür können vielfältig sein, in der Regel ist es aber eine der folgenden zwei Ursachen:

- Die USB-Verbindung ist elektrisch oder mechanisch instabil
- Ein anderes Programm auf dem Computer kommuniziert ebenfalls mit dem ftDuino

Mechanisch oder elektrisch instabile Verbindungen werden in der Regel von lose sitzenden USB-Kabeln verursacht. Meistens reicht es in diesem Fall, leicht am USB-Kabel zu wackeln, um den ftDuino kurz die Spannung verlieren und neu starten zu lassen. Passiert das während des Sketch-Uplads, so ist der Sketch nicht lauffähig und der ftDuino wird wie in Abschnitt 1.3.2 beschrieben nur noch nach Druck auf den Reset-Taster vom PC erkannt.

In der Regel flackert dabei auch die Power-LED etwas. In Abbildung 1.17 wurde der entsprechende Fehler provoziert, indem während des Flashens der USB-Stecker abgezogen wurde. Die Verwendung eines anderen USB-Kabels schafft dann in der Regel Abhilfe.

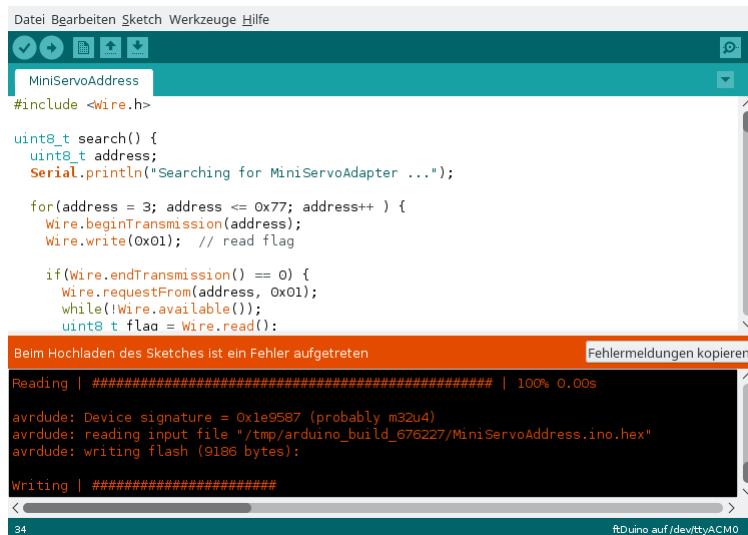


Abbildung 1.17: Fehler beim Hochladen

Liegt kein Wackelkontakt am USB-Port vor, dann geben die “ausführlichen Ausgaben” beim Upload ggf. zusätzliche Informationen. Diese Ausgaben werden in den Voreinstellungen aktiviert.

Eine mögliche Ausgabe sieht danach so aus:

```

Writing | #####| avrdude: error: programmer did not respond to command: set addr
avrdude: error: programmer did not respond to command: write block
## ***failed;
avrdude: Error: butterfly programmer uses avr_write_page() but does not
provide a cmd() method.

```

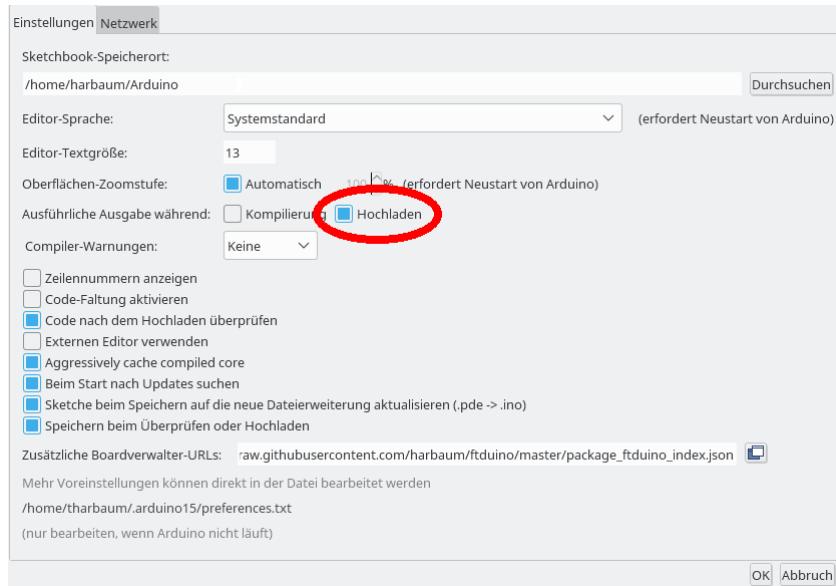


Abbildung 1.18: Ausführliche Debug-Ausgaben während des Hochladens aktivieren

```
*** page 127 (addresses 0x0000 - 0x007f) failed to write
***failed;
***failed;
***failed;
***failed;
```

Hier treten mitten in der Datenübertragung Fehler auf. Am häufigsten tritt dies auf Linux-PCs auf. Ursache ist in der Regel der sogenannte Modem-Manager, eine Software, die zur Verwaltung von Modems verwendet wird und sich mit dem **ftDuino** verbindet, um festzustellen, ob es sich bei ihm um ein Modem handelt. Einige Tipps dazu finden sich bereits in Abschnitt 2.1.4.

Neben der dort beschriebenen Installation der Datei `/etc/udev/rules.d/99-ftduino.rules` hilft es oft, den Modem-Manager-Dienst per `systemctl`-Kommando zunächst testweise zu stoppen:

```
sudo systemctl stop ModemManager.service
```

bzw. bei Erfolg dauerhaft:

```
sudo systemctl disable ModemManager.service
```

Dieses Problem ist nicht **ftDuino**-spezifisch, sondern betrifft z.B. auch den Arduino-Leonardo. Entsprechende Lösungen im Internet bei Leonardo-Problemen lassen sich daher oft auch auf den **ftDuino** übertragen.

1.3.5 Der **ftDuino** wird als Leonardo erkannt

Es ist möglich, dass der **ftDuino** sich seiner Identität nicht so ganz sicher zu sein scheint und in der IDE statt als **ftDuino** als Leonardo angesetzt wird wie in Abbildung 1.19 beispielhaft auf einem Linux-System zu sehen.

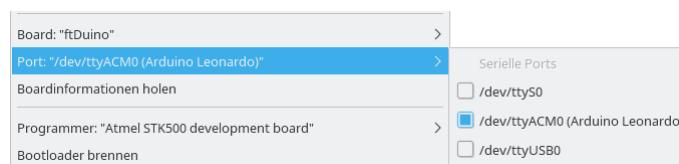


Abbildung 1.19: Die IDE erkennt den **ftDuino** als Leonardo

Das passiert, wenn man vor dem Upload eines Sketches in der IDE nicht den **ftDuino** als Board ausgewählt hatte sondern den Arduino Leonardo.

Dieser Zustand ist völlig unkritisch. Sobald man das Board wie unter anderem in Abschnitt 2.2.2 beschrieben auf ftDuino einstellt wird dieser nach dem nächsten erfolgreichen Sketch-Upload wieder als ftDuino erkannt.

Kapitel 2

Installation

Die Installation der Software zur Benutzung des ftDuino erfolgt in mehreren Schritten. Zu allererst muss der Computer mit dem ftDuino bekannt gemacht werden, in dem ein passender Treiber dafür sorgt, dass der Computer erfährt wie er mit dem ftDuino zu kommunizieren hat.

Im zweiten Schritt wird dann die sogenannte Arduino-IDE installiert, also die eigentliche Programmierumgebung sowie die Arduino-IDE mit dem ftDuino verbunden.

Für die Installation und auch für die im Kapitel 3 folgenden ersten Schritte reicht es, den ftDuino per USB mit dem PC zu verbinden. Eine zusätzliche Stromversorgung per Netzteil oder Batterie ist erst nötig, wenn die Ausgänge des ftDuino verwendet werden sollen.

2.1 Treiber

Unter den meisten Betriebssystemen wird der ftDuino vom Computer direkt erkannt, sobald er angesteckt wird. Das trifft unter anderem auf Linux, MacOS X und Windows 10 zu, aber nicht für Windows 7.

2.1.1 Windows 10

Die Verwendung des ftDinos unter Windows 10 erfordert keine Treiberinstallation durch den Anwender.

Sobald der ftDuino an einen PC unter Windows 10 angesteckt wird werden die passenden Treiber automatisch installiert. Windows 10 zeigt dies beim ersten Anschließen des ftDuino durch eine entsprechende Meldung am unteren rechten Bildschirmrand an. Nach einigen Sekunden ist die Installation abgeschlossen und der ftDuino benutzbar.

Weiteres An- und Abstecken erzeugt keine weiteren Meldungen, allerdings ist die erfolgreiche Erkennung des ftDuino unter Windows 10 jederzeit an der typischen Melodie zu erkennen, die ein Windows-PC beim Erkennen von Hardware ausgibt.

2.1.2 Windows 8.0 und Windows 8.1

Die Treiberinstallation unter Windows 8 ist recht undankbar. Und falls möglich sollte auf Windows 10 ausgewichen werden.

Das Problem unter Windows 8 ist die Tatsache, dass die .inf-Datei unter <https://harbaum.github.io/ftduino/ftduino/driver/ftduino.inf> nicht von Microsoft signiert wurde und Windows 8 es dem Benutzer deutlich schwerer als z.B. Windows 7 macht, einen nicht-signierten Treiber zu installieren. Das ist in diesem Fall besonders ärgerlich, da es sich beim eigentlichen Treiber über eine bereits von Microsoft mitgelieferte Komponente handelt und die .inf-Datei Windows 8 lediglich auffordert, diese auch zu benutzen. Der eigentliche Treiber kommt von Microsoft und ist entsprechend signiert.

Beim Download der .inf-Datei ist darauf zu achte, dass sie nicht als .txt-Datei gespeichert wird. Einige Windows- und Browerversionen hängen beim Download der Datei oft unsichtbar die .txt-Endung an.

Diverse Anleitungen im Internet zur Installation nicht-signierter Treiber sind unter dem Suchbegriff "windows 8 nicht signierte treiber installieren" leicht zu finden. Im folgenden sind die wesentlichen Schritte kurz zusammengefasst:

1. Öffnen des Einstellungsbereich des Charms-Menüs mit Windows-Taste + Taste 'I'. Klick auf Ausschalten.
2. Shift-Taste gedrückt halten und Neustart auswählen. Danach erscheint ein Menü, in dem nacheinander Problembehandlung, dann Erweiterte Optionen, Starteinstellungen und schließlich Neustart gewählt werden muss.
3. Nach dem Bootvorgang erscheint ein neues Menü, in dem man mit Eingabe der Taste '7' (F7 oder 7 auf Ziffernblock) die Treibersignierung ausschalten kann, um so den unsignierten Treiber zulassen zu können.

2.1.3 Windows 7 und Windows Vista

Windows 7 und Windows Vista bringen den passenden Treiber ebenfalls bereits mit. Allerdings muss eine passende .inf-Datei geladen werden, um dafür zu sorgen, dass Windows diesen Treiber für den ftDuino nutzt.

Dass kein Treiber geladen ist erkennt man u.a. daran, dass der ftDuino im Gerätemanager unter "Andere Geräte" aufgeführt wird.

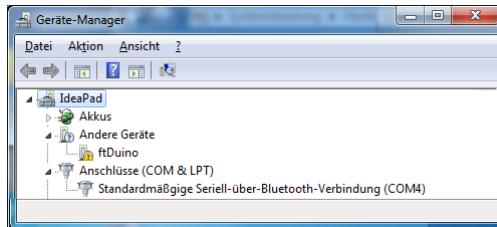


Abbildung 2.1: ftDuino ohne passenden Treiber unter Windows 7

Die .inf-Datei ist unter <https://harbaum.github.io/ftduino/ftduino/driver/ftduino.inf> zu finden.

Beim Download der .inf-Datei ist darauf zu achte, dass sie nicht als .txt-Datei gespeichert wird. Einige Windows- und Browerversionen hängen beim Download der Datei oft unsichtbar die .txt-Endung an.

Nach dem Download reicht ein Rechtsklick auf die Datei und die Auswahl von "Installieren" im folgenden Menü.

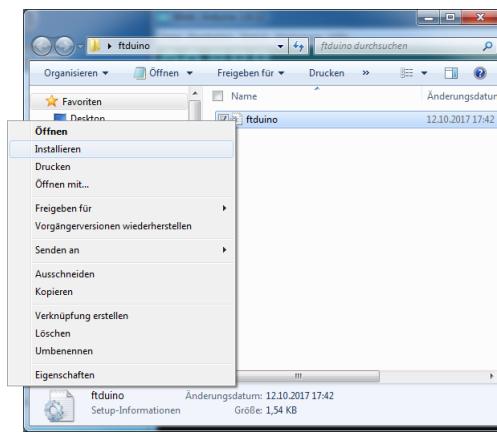


Abbildung 2.2: Rechtsklick auf ftduino.inf

Windows bietet daraufhin an, den Treiber zu installieren.

Ggf. erfolgt noch eine Sicherheitsabfrage. Dieser Frage kann man getrost zustimmen, da der eigentliche Treiber bereits Teil von Windows 7 bzw. Windows Vista ist. Die ftduino.inf-Datei fordert Windows lediglich auf, ihn zu verwenden.

Sobald die Installation erfolgreich war wird der ftDuino als sogenannter COM:-Port eingebunden.

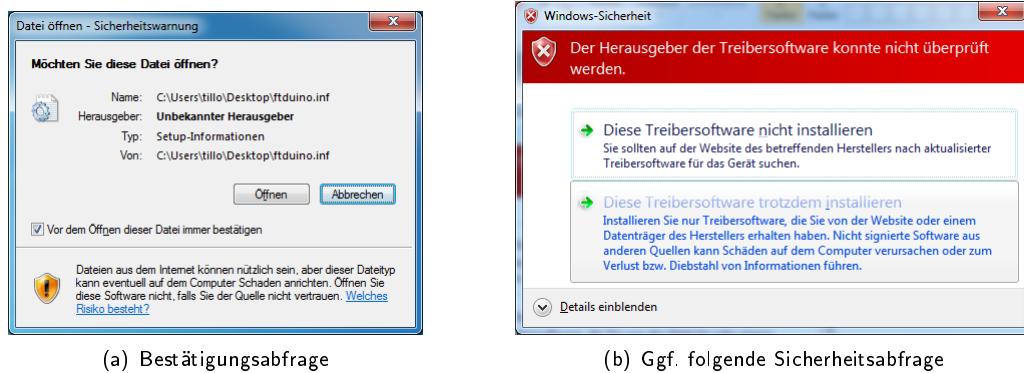


Abbildung 2.3: Installation des Treibers

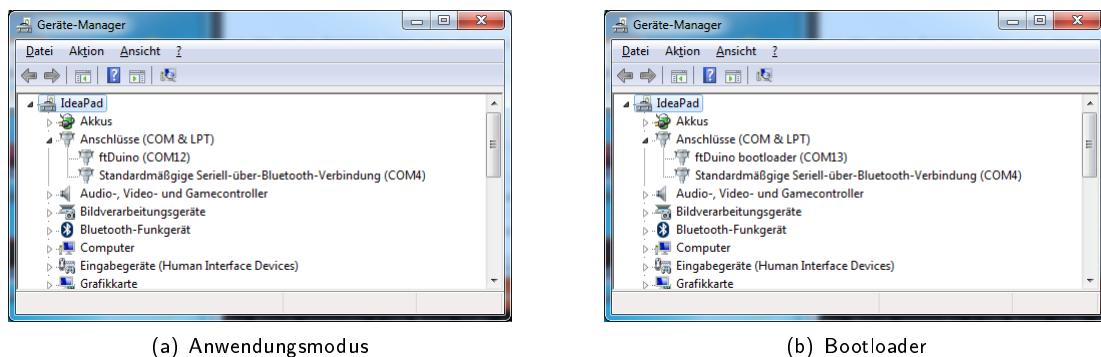


Abbildung 2.4: ftDuino mit passendem Treiber unter Windows 7

Je nach Betriebsmodus des ftDuino und je nach installierter Anwendung auf dem ftDuino befindet er sich im Anwendungsmodus oder im Bootloader. Windows unterscheidet zwischen beiden Zuständen und weist zwei unterschiedliche COM:-Ports zu. Das ist so gewollt und soll nicht weiter irritieren. In den meisten Fällen wird der Benutzer nur den Anwendungsmodus zu sehen bekommen.

2.1.4 Linux

Der ftDuino wird von einem handelsüblichen Linux-PC ohne weitere manuelle Eingriffe erkannt. Da er das sogenannte "Abstract Control Model" (ACM) implementiert taucht er im Linux-System unter /dev/ttyACMX auf, wobei X eine fortlaufende Nummer ist. Sind keine weiteren ACM-Geräte verbunden, so wird der ftDuino als /dev/ttyACM0 eingebunden.

Mehr Details erfährt man z.B. direkt nach dem Anstecken des ftDuino mit dem dmesg-Kommando:

```
$ dmesg
...
[15822.397956] usb 3-1: new full-speed USB device number 9 using xhci_hcd
[15822.540331] usb 3-1: New USB device found, idVendor=1c40, idProduct=0538
[15822.540334] usb 3-1: New USB device strings: Mfr=1, Product=2, SerialNumber=3
[15822.540336] usb 3-1: Product: ftDuino
[15822.540337] usb 3-1: Manufacturer: Till Harbaum
[15822.541084] cdc_acm 3-1:1.0: ttyACM0: USB ACM device
```

Die genauen Meldungen variieren von System zu System, aber der generelle Inhalt wird vergleichbar sein.

Weitere Details zum erkannten USB-Gerät liefert das lsusb-Kommando:

```
$ lsusb -vd 1c40:0538
Bus 003 Device 009: ID 1c40:0538 EZPrototypes
Device Descriptor:
```

```

bLength          18
bDescriptorType   1
bcdUSB           2.00
bDeviceClass      239 Miscellaneous Device
bDeviceSubClass    2 ?
bDeviceProtocol     1 Interface Association
bMaxPacketSize0     64
idVendor          0x1c40 EZPrototypes
idProduct          0x0538
...

```

Diese Ausgaben sind besonders interessant, wenn man wie in Abschnitt 6.10 oder 6.16 beschrieben die erweiterten USB-Möglichkeiten des **ftDuino** nutzt.

Uploadfehler oder “Device or resource busy”

Auch wenn Linux bereits den eigentlichen Gerätetreiber mitbringt kann es trotzdem nötig sein, die Systemkonfiguration anzupassen. Das Symptom ist, dass es beim Versuch, auf den **ftDuino** zuzugreifen, in der Arduino-IDE zu der folgenden Fehlermeldung kommt.



Abbildung 2.5: Fehlermeldung bei installiertem ModemManager

Mögliche Ursache: Der Modemmanager

In diesem Fall ist eine wahrscheinlichste Ursache, dass der **ModemManager**, ein Programm zur Bedienung von Modems, installiert ist und sich mit dem **ftDuino** verbunden hat. Um zu verhindern, dass der ModemManager versucht, sich mit dem **ftDuino** zu verbinden, ist die Eingabe des folgenden Kommandos nötig:

```
sudo wget -P /etc/udev/rules.d https://raw.githubusercontent.com/harbaum/ftduino/master/ftduino/driver/99-ftduino.rules
```

Die Datei `/etc/udev/rules.d/99-ftduino.rules` muss danach exakt folgenden Inhalt haben:

```
ATTRS{idVendor}=="1c40" ATTRS{idProduct}=="0537", ENV{ID_MM_DEVICE_IGNORE}="1"
ATTRS{idVendor}=="1c40" ATTRS{idProduct}=="0538", ENV{ID_MM_DEVICE_IGNORE}="1", MODE="0666"
```

Danach muss der **ftDuino** einmal kurz vom PC getrennt und wieder angesteckt werden und sollte in der Folge ohne Probleme zu verwenden sein.

Das Kommando legt eine Datei namens `/etc/udev/rules.d/99-ftduino.rules` an. Diese Datei enthält Regeln, wie der Linux-Kernel mit bestimmten Ereignissen umgehen soll. In diesem Fall soll beim Einsticken eines USB-Gerätes mit der Hersteller-Identifikation 1c40 und den Geräteidentifikationen 0537 und 0538 dieses vom ModemManager ignoriert werden. Zusätzlich werden die Zugriffsrechte auf das USB-Gerät etwas ausgeweitet, so dass der in Abschnitt 6.18.1 beschriebene Zugriff aus dem Web-Browser funktioniert.

In einigen Linux-Setups reicht die Installation der Datei nicht, um den ModemManager von seinen Störungen abzuhalten. In dem Fall hilft es, den ModemManager zu deaktivieren, auf den in der Regel problemlos verzichtet werden kann. Das folgende Kommando stoppt den ModemManager auf vielen gängigen Linux-Installationen bis zu nächsten Systemstart:

```
sudo systemctl stop ModemManager.service
```

Bringt das Kommando den erwünschten Effekt, dann kann die Einstellung mit dem folgenden Kommando dauerhaft gemacht werden:

```
sudo systemctl disable ModemManager.service
```

Der ModemManager wird dann auch nach einem Systemstart nicht wieder gestartet.

Mögliche Ursache: Fehlende Gruppenmitgliedschaft

Eine weitere verbreitet Hürde unter Linux sind die Zugriffsrechte auf die Hardware, die zum Zugriff auf die USB-Schnittstelle des **ftDuino** nötig sind.

Ist der **ftDuino** an den Linux-PC angechlossen, so wird ihm wie in Abschnitt 2.1.4 erwähnt ein Device **ttyACM** zugewiesen. Ist dies z.B. **ttyACM0** so erhält man mit dem **ls**-Kommando mehr Informationen:

```
$ ls -l /dev/ttyACM0
crw-rw---- 1 root dialout 166, 0 Jul 27 23:06 /dev/ttyACM0
```

Wichtig ist hier das Wort **dialout**, denn das ist der Name der Gruppe, die Zugriff auf diese Schnittstelle hat. Ob man selbst dazu gehört sagt einem das **groups**-Kommando:

```
$ groups
harbaum adm dialout cdrom sudo dip plugdev lpadmin sambashare
```

In diesem Fall taucht **dialout** in der Liste auf und der Nutzer hat die damit entsprechenden Rechte. Taucht **dialout** nicht auf, so kann z.B. der Benutzer **harbaum** der Gruppe beitreten mit dem Kommando:

```
$ sudo adduser harbaum dialout
```

Danach muss man sich einmal vom System ab- und wieder anmelden, um die neuen Rechte nutzen zu können.

2.2 Arduino-IDE

Die integrierte Entwicklungsumgebung (IDE) für den Arduino bekommt man kostenlos für die gängigsten Betriebssysteme unter <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>. Die Windows-Version mit eigenem Installer ist dort z.B. direkt unter dem Link https://www.arduino.cc/download_handler.php erreichbar. Diese Arduino-IDE wird zunächst installiert.

2.2.1 Arduino-IDE für Linux aus dem Ubuntu-Software-Store

Unter Linux hat man neben dem Download der IDE von <http://arduino.cc> oft auch die Möglichkeit, die IDE direkt aus einem Repository oder Store der entsprechenden Linux-Distribution zu beziehen. Das hat theoretisch den Vorteil einer einfachen und schnellen Installation. Der Ubuntu-Store bietet zum Beispiel die in Abbildung 2.6 dargestellte Version an. Das Benutzerrating von nur drei Sternen oben rechts im Bild hat dabei allerdings einen guten Grund.

Diese Version der Arduino-IDE wurde auf die relativ neue auf dem sogenannten SNAP-Format basierende Paketverwaltung aufgebaut. Neu in SNAP ist, dass die Rechte der Programme verwaltet werden wie man es auch von Smartphone-Apps kennt. Nun benötigt die Arduino-IDE für eine korrekte Funktion Zugriff auf die USB-Aschlüsse, an denen der **ftDuino** angeschlossen ist. Eben solche Rechte zu vergeben unterstützt Ubuntu-Linux aber zur Zeit (Stand 28.7.2019) nicht. Daher lässt sie sich die Arduino-IDE zwar aus dem Store installieren, aber der Zugriff auf den **ftDuino** (sowie jeden anderen Arduino) ist nicht möglich. Es gibt zwei Lösungen dieses Problems:

1. Man installiert das Programm aus dem Store nicht in der grafischen Oberfläche sondern in der Kommandozeile durch Eingabe von `sudo snap install --devmode arduino-mhall119`. Mehr Infos dazu finden sich z.B. unter ¹.
2. Man installiert die Arduino-IDE aus dem Archiv auf <https://www.arduino.cc/en/main/software>

In beiden Fällen muss man unter Ubuntu die Rechte anpassen wie in Abschnitt 2.1.4 beschrieben und den Modemmanger deinstallieren wie in Abschnitt 2.1.4 beschrieben.

2.2.2 Installation mit dem Boardverwalter

Um den **ftDuino** unter der Arduino-IDE nutzen zu können muss eine entsprechende Konfiguration vorgenommen werden. Die Arduino-IDE erlaubt es, diesen Vorgang weitgehend zu automatisieren.

¹Ankündigung "Snap package for Arduino IDE": <https://groups.google.com/a/arduino.cc/forum/#topic/developers/Qp-G910Mt9c>

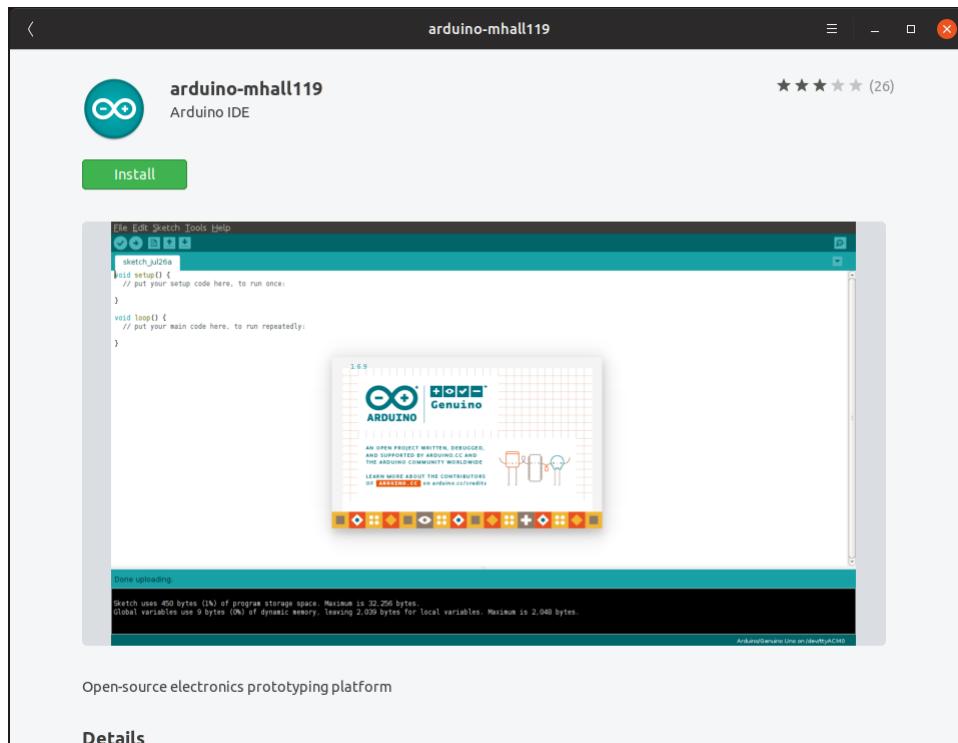


Abbildung 2.6: Die Arduino-IDE aus dem Ubuntu-Software-Store hat ihre Tücken

Für die einfache Installation zusätzlicher Boards bringt die Arduino-IDE den sogenannten Boardverwalter mit. Zunächst muss dem Boardverwalter in den Arduino-Voreinstellungen mitgeteilt werden, wo die **ftDuino**-Konfiguration zu finden ist.

Dazu trägt man https://harbaum.github.io/ftduino/package_ftduino_index.json in den Voreinstellungen wie folgt ein. Beim Eintragen der entsprechende Zeile ist darauf zu achten, dass die URL Unterstriche (_) enthält, die ggf. beim Kopieren (Copy'n Paste) der URL aus diesem PDF-Dokument verloren gehen. In diesem Fall sollte die URL manuell eingegeben werden.

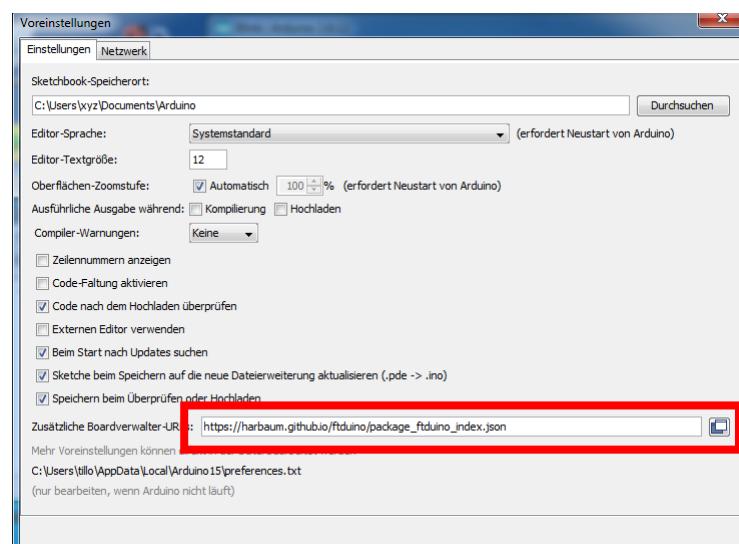


Abbildung 2.7: URL der **ftDuino**-Konfiguration in den Arduino-Voreinstellungen

Den eigentlichen Boardverwalter erreicht man danach direkt über das Menü der IDE unter **Werkzeuge > Board: ... > Boardverwalter...**.

Nachdem die JSON-Datei in den Voreinstellungen eingetragen wurde bietet der Boardverwalter automatisch die **ftDuino**-Konfiguration an.

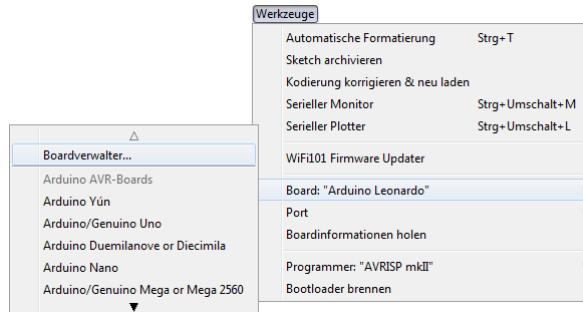


Abbildung 2.8: Den Boardverwalter startet man aus dem Menü



Abbildung 2.9: Im Boardverwalter kann das ftDuino-Board installiert werden

Durch Klick auf **Installieren...** werden alle für den **ftDuino** nötigen Dateien automatisch heruntergeladen und installiert. Nach erfolgreicher Installation kann der **ftDuino** unter den Boards ausgewählt werden.

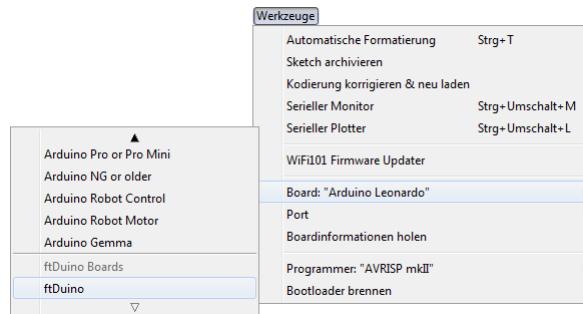


Abbildung 2.10: Auswahl des ftDuino-Boards unter Windows

Ist bereits ein **ftDuino** angeschlossen und wurde der nötige Treiber installiert, so lässt sich der **ftDuino** nun unter **Port** auswählen.

Die Installation ist damit abgeschlossen. Während der Installation wurden bereits einige Beispielprogramme installiert. Diese finden sich im Menü unter **Datei > Beispiele > Examples for ftDuino**.

Diese Beispiele können direkt geladen und auf den **ftDuino** hinuntergeladen werden.

2.2.3 Updates

Die Arduino-IDE benachrichtigt automatisch über Softwareupdates der **ftDuino**-Konfiguration. Mit wenig Aufwand bleibt man so immer auf dem aktuellen Stand.

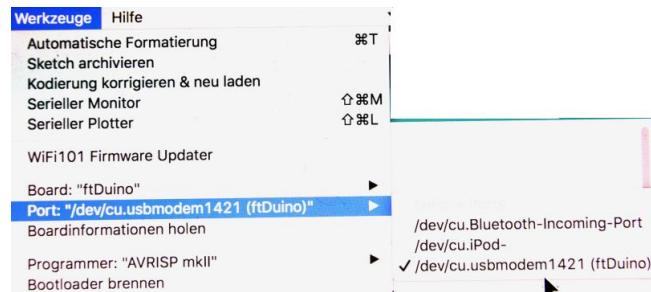


Abbildung 2.11: Auswahl des Ports unter MacOS

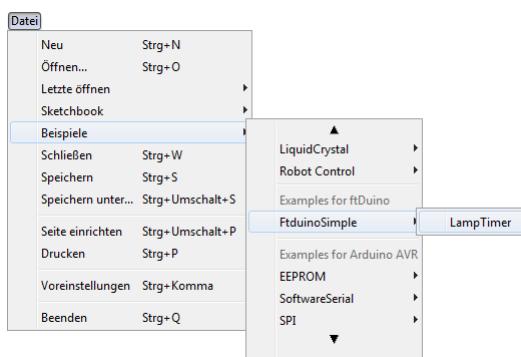


Abbildung 2.12: Beispiele zum ftDuino-Board

Kapitel 3

Erste Schritte

In diesem Kapitel geht es darum, erste Erfahrungen mit dem ftDuino und der Arduino-IDE zu sammeln. Voraussetzung ist, dass der ftDuino von einem passenden Treiber auf dem PC unterstützt wird und dass die Arduino-IDE wie in Kapitel 2 beschrieben installiert und für die Verwendung des ftDinos vorbereitet wurde.

Zusätzlich zum ftDuino wird ein handelsübliches Mini-USB-Kabel benötigt, wie es z.B. auch mit den fischertechnik TX und TXT verwendet wird.

3.1 Der erste Sketch

Für die ersten Versuche benötigt der ftDuino keine separate Stromversorgung. Es genügt, wenn er per USB vom PC versorgt wird. Die fischertechnik-Ein- und Ausgänge bleiben zunächst unbenutzt.

Als erstes kann man den folgenden Sketch direkt in der Arduino-IDE eingeben. Das Beispiel muss aber nicht zwingend manuell eingetippt werden, denn es findet sich als fertig mitgeliefertes Beispiel im Datei -Menü der Arduino-IDE unter Datei > Beispiele > FtduinoSimple > Blink .

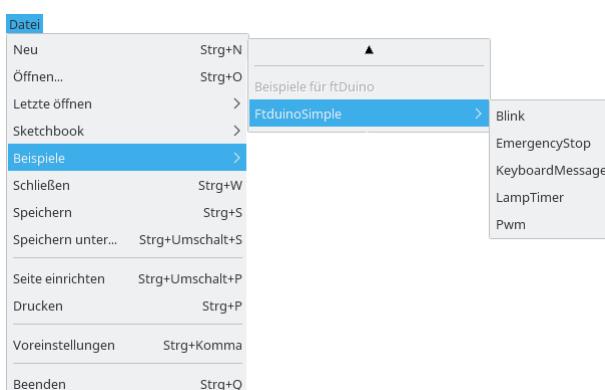


Abbildung 3.1: Die ftDuino-Beispiele in der Arduino-IDE

Alle vorinstallierten Beispiele können mit einem Klick geladen werden und es öffnet sich ein neues Fenster mit dem ausgewählten Beispiel.

```
1  /*
2   * Blink
3   *
4   * Schaltet die interne rote LED des ftDuino für eine Sekunde ein
5   * und für eine Sekunde aus und wiederholt dies endlos.
6   *
7   * Original:
8   * http://www.arduino.cc/en/Tutorial/Blink
9  */
```

```

10 // die setup-Funktion wird einmal beim Start aufgerufen
11 void setup() {
12     // Konfiguriere den Pin, an den die interne LED angeschlossen ist, als Ausgang
13     pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
14 }
15
16
17 // die loop-Funktion wird immer wieder aufgerufen
18 void loop() {
19     digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);    // schalte die LED ein (HIGH ist der hohe Spannungspiegel)
20     delay(1000);                      // warte 1000 Millisekunden (eine Sekunde)
21     digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);    // schalte die LED aus, indem die Spannung auf
22                                // niedrigen Pegel (LOW) geschaltet wird
23     delay(1000);                      // warte eine Sekunde
24 }
```

3.1.1 Download des Blink-Sketches auf den ftDuino

Der Blink-Sketch sollte nun geöffnet sein. Der ftDuino sollte an den PC angeschlossen sein und im Menü unter Werkzeuge > Board der ftDuino ausgewählt sowie der richtige COM:-Port unter Werkzeuge > Port ausgewählt sein.

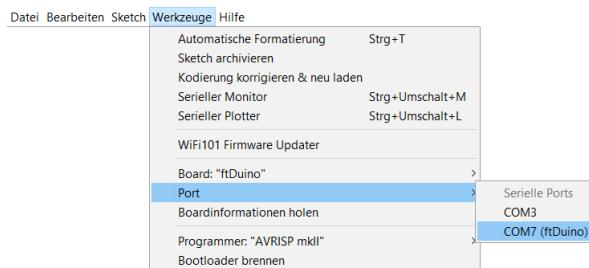


Abbildung 3.2: Auswahl des Ports in der Arduino-IDE unter Windows

Dies zeigt die Arduino-IDE auch ganz unten rechts in der Statusleiste an.



Abbildung 3.3: Der ausgewählte ftDuino wird in der Statusleiste angezeigt

Der Download des Sketches auf den ftDuino erfordert nur noch einen Klick auf die Download-Pfeil-Schaltfläche in der Arduino-IDE oben links.



Abbildung 3.4: Download-Schaltfläche der Arduino-IDE

Der Sketch wird von der IDE zunächst in Maschinencode übersetzt. Wenn die Übersetzung erfolgreich war wird der Maschinencode über die USB-Verbindung auf den ftDuino übertragen und dort im Flash-Speicher abgelegt.

Während des Downloads zeigt die interne rote Leuchtdiode des ftDuino wie in Abschnitt 1.2.4 beschrieben an, dass der Bootloader aktiviert wird und dass der Download stattfindet.

Nach erfolgreichem Download startet der Sketch sofort und die interne rote Leuchtdiode blinkt langsam.

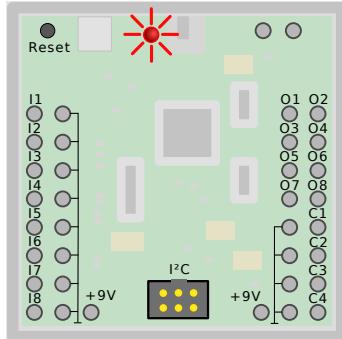


Abbildung 3.5: Blinkende interne rote Leuchtdiode im **ftDuino**

3.1.2 Die Funktionsweise des Sketches

Der Sketch-Code besteht zum überwiegenden Teil aus erklärenden Kommentaren, die für die Funktion des Sketches völlig unbedeutend sind und lediglich dem Verständnis durch einen menschlichen Leser dienen. Kommentarzeilen beginnen mit einem doppelten Schrägstrich (//). Mehrzeilige Kommentare werden durch /* und */ eingeschlossen. In diesem Dokument sowie in der Arduino-IDE sind Kommentare an ihrer hellgrauen Färbung leicht zu erkennen. Tatsächlicher Code befindet sich lediglich in den Zeilen 12 bis 15 sowie den Zeilen 18 bis 24.

3.1.3 Die Funktionen `setup()` und `loop()`

Jeder Arduino-Sketch enthält mindestens die beiden Funktionen `setup()` (englisch für Einrichtung) und `loop()` (englisch für Schleife). Zwischen den beiden geschweiften Klammern ({ und }) befinden sich jeweils durch Semikolon abgetrennt die eigentlichen durch den **ftDuino** auszuführenden Befehle. Die Befehle in der Funktion `setup()` werden einmal bei Sketch-Start ausgeführt. Sie werden üblicherweise verwendet, um initiale Einstellungen vorzunehmen oder Ein- und Ausgänge zu parametrieren. Die Befehle der `loop()`-Funktion werden hingegen immer wieder ausgeführt solange der **ftDuino** eingeschaltet bleibt oder bis er neu programmiert wird. Hier findet die eigentliche Sketch-Funktion statt und hier wird auf Sensoren reagiert und Aktoren werden angesteuert.

Auch das Blink-Beispiel arbeitet so. In der `setup()`-Funktion wird in Zeile 14 der mit der roten Leuchtdiode verbundene interne Anschluss im **ftDuino** zum Ausgang erklärt.

In der `loop()`-Funktion wird dann in Zeile 19 der interne Anschluss der roten Leuchtdiode eingeschaltet (Spannungspiegel hoch, HIGH) und in Zeile 21 wird er ausgeschaltet (Spannungspiegel niedrig, LOW). Zwischendurch wird jeweils in den Zeilen 20 und 23 1000 Millisekunden bzw. eine Sekunde gewartet. Die Leuchtdiode wird also eingeschaltet, es wird eine Sekunde gewartet, sie wird ausgeschaltet und es wird eine weitere Sekunde gewartet. Dies passiert immer und immer wieder, so dass die Leuchtdiode mit einer Frequenz von 0,5 Hertz blinkt.

3.1.4 Anpassungen am Sketch

Für den Einstieg ist es oft sinnvoll, mit einem vorgefertigten Sketch zu starten und dann eigene Änderungen vorzunehmen. Die Beispiele der Arduino-IDE stehen aber allen Benutzern eines PCs zur Verfügung und können daher zunächst nicht verändert werden. Nimmt man an einem Beispiel-Sketch Änderungen vor und versucht sie zu speichern, dann weist einen die Arduino-IDE darauf hin, dass man eine eigene Kopie anlegen soll. Dazu öffnet die Arduino-IDE einen Dateidialog und man hat die Möglichkeit, den Sketch vor dem Speichern umzubenennen z.B. in **SchnellBlink**.



Abbildung 3.6: Die Arduino-IDE fordert zum Speichern einer eigenen Kopie auf

Sobald man auf diese Weise eine eigene Kopie angelegt hat kann man sie beliebig verändern. Die eigene Kopie wird im Menü der Arduino-IDE unter **Datei > Sketchbook** eingefügt und kann von dort später jederzeit wieder geladen werden.

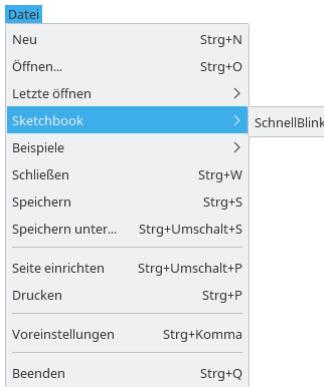


Abbildung 3.7: Kopie SchnellBlink im Sketchbook der Arduino-IDE

Im Sketch kann man nun beispielsweise aus den 1000 Millisekunden in den Zeilen 20 und 23 jeweils 500 Millisekunden machen.

```
18 void loop() {
19   digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);      // schalte die LED ein (HIGH ist der hohe Spannungspiegel)
20   delay(500);                         // warte 500 Millisekunden (eine halbe Sekunde)
21   digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);       // schalte die LED aus, indem die Spannung auf
22                                // niedrigen Pegel (LOW) geschaltet wird
23   delay(500);                         // warte eine halbe Sekunde
24 }
```

Nach erfolgreichem Download wird die Leuchtdiode dann jeweils für 0,5 Sekunden ein- und ausgeschaltet und die Blinkfrequenz verdoppelt sich auf ein Hertz.

3.2 Ansteuerung von fischertechnik-Komponenten

Um die interne Leuchtdiode des **ftDuino** blinken zu lassen hätten wir keinen **ftDuino** benötigt. Alle Arduinos verfügen über eine solche interne Leuchtdiode und hätten für unser erstes Beispiel verwendet werden können.

Seine speziellen Fähigkeiten spielt der **ftDuino** aus, wenn es darum geht mit den üblichen fischertechnik-Sensoren und -Aktoren umzugehen. Der Blink-Sketch soll daher so erweitert werden, dass zusätzlich zu Leuchtdiode eine am Ausgang 01 angeschlossene Lampe blinkt.

Angeschlossen wird dazu eine normale fischertechnik-Lampe mit einem Stecker an den Ausgang 01 des **ftDuino** und mit dem zweiten Stecker an einen der Masseanschlüsse des **ftDuino**. Masseanschlüsse sind die 12 Anschlüsse, die in der Abbildung 3.8 mit einem Massesymbol \perp verbunden sind.

Da nun die mit 9 Volt betriebenen fischertechnik-Ausgänge verwendet werden muss der **ftDuino** zusätzlich mit 9 Volt versorgt werden. Das kann z.B. über ein übliches fischertechnik-Netzteil erfolgen oder über einen Batteriehalter. Beide Anschlüsse sind verpolungsgeschützt, speziell beim Anschluss der Batterie kann man also keinen Schaden anrichten.

3.2.1 Der Sketch

Der folgende Beispiel-Sketch **Blink01** findet sich auch im **Datei**-Menü der Arduino-IDE unter **Datei > Beispiele > FtduinoSimple > Blink01**.

```
1 // Blink01.ino
2 //
3 // Blinken einer Lampe an Ausgang 01
4 //
5 // (c) 2018 by Till Harbaum <till@harbaum.org>
6
```

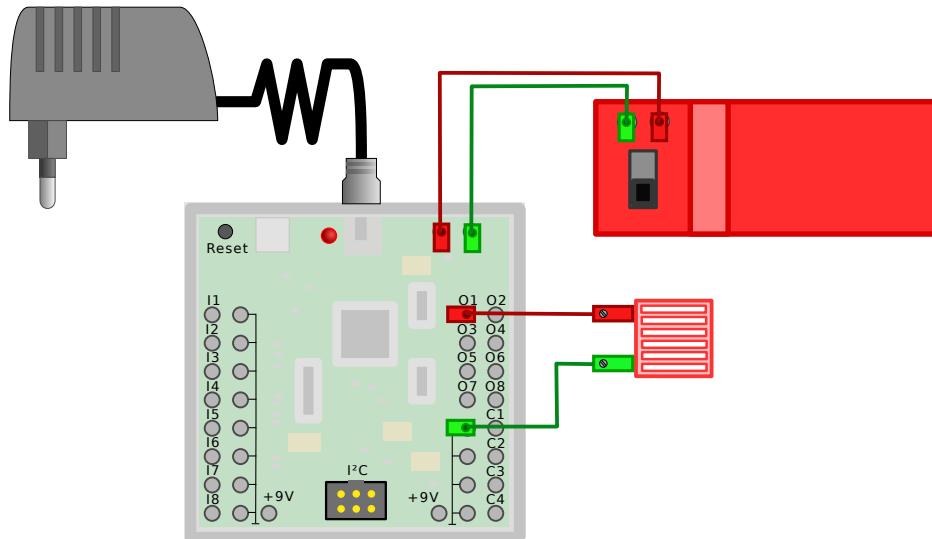


Abbildung 3.8: Blinkende fischertechnik-Lampe am **ftDuino**

```

7 #include <FtduinoSimple.h>
8
9 void setup() {
10 // LED initialisieren
11 pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
12 }
13
14 void loop() {
15 // schalte die interne LED und den Ausgang 01 ein (HIGH bzw. HI)
16 digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
17 ftduino.output_set(Ftduino::01, Ftduino::HI);
18
19 delay(1000); // warte 1000 Millisekunden (eine Sekunde)
20
21 // schalte die interne LED und den Ausgang 01 aus (LOW bzw. LO)
22 digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
23 ftduino.output_set(Ftduino::01, Ftduino::LO);
24
25 delay(1000); // warte eine Sekunde
26 }
```

Der Sketch unterscheidet sich nur in wenigen Details vom ursprünglichen Blink-Sketch. Neu hinzugekommen sind die Zeilen 7, 17 und 23. In Zeile 7 wird eine Bibliothek eingebunden, die speziell für den **ftDuino** mitgeliefert wird und den Zugriff auf die Ein- und Ausgänge des **ftDuino** vereinfacht. In den Zeilen 17 und 23 wird der Ausgang 01 eingeschaltet (HI) bzw. ausgeschaltet (LO). Weitere Details zu dieser Bibliothek finden sich in Kapitel 9.

Die Kommandos zum Ein- und Ausschalten der internen Leuchtdiode sind nach wie vor vorhanden, so dass die interne Leuchtdiode nun parallel zur extern angeschlossenen Lampe blinkt.

Weitere einfache Beispiele und Erklärungen zur Benutzung der Ein- und Ausgänge in eigenen Sketches finden sich in Abschnitt 9.1.1.

3.2.2 Eingänge

Zum Anschluss an übliche fischertechnik-Taster, -Fototransistoren und ähnlich verfügt der **ftDuino** über die acht Eingänge I1 bis I8 und die Zählereingänge C1 bis C4.

Der Zugriff auf diese Eingänge erfolgt über passende Bibliotheken wie in Abschnitt 9 dargestellt. Über die **FtduinoSimple**-Bibliothek kann der Schaltzustand eines Tasters abgefragt werden:

```
1 #include <FtduinoSimple.h>
```

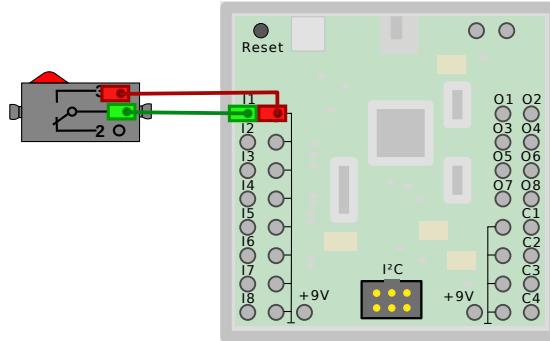


Abbildung 3.9: Taster am Eingang I1 des ftDuino

```

2
3 void setup() {
4     // keine Initialisierung noetig
5 }
6
7 void loop() {
8     // lies den Zustand einer Taste an Eingang I1
9     if(ftduino.input_get(Ftduino::I1)) {
10         /* ... tue etwas ... */
11     }
12 }
```

Um Analogwerte wie Spannungen und Widerstände einzulesen ist der erweiterte Funktionsumfang der Ftduino-Bibliothek nötig. Bei ihrer Verwendung muss zunächst der Messmodus des Eingangs eingestellt werden, bevor Widerstands-Werte gelesen werden können:

```

1 #include <Ftduino.h>
2
3 void setup() {
4     // Initialisierung der Ftduino - Bibliothek
5     ftduino.init();
6
7     // Eingang I1 zur Widerstandsmessung vorbereiten
8     ftduino.input_set_mode(Ftduino::I1, Ftduino::RESISTANCE);
9 }
10
11 void loop() {
12     // Auswertung des Widerstands an Eingang I1
13     uint16_t widerstand = ftduino.input_get(Ftduino::I1);
14     /* ... tue etwas ... */
15 }
```

In den Experimenten in Kapitel 6 finden sich diverse Beispiele, in denen die Eingänge des ftDuino ausgewertet werden inklusive spezieller Sensoren wie dem Temperatursensor in Abschnitt 6.7.

3.3 Kommunikation mit dem PC

Der ftDuino ist primär dafür gedacht, ein Modell autonom zu steuern und während des Betriebs nicht auf die Hilfe eines PC angewiesen zu sein. Trotzdem gibt es Gründe, warum auch im laufenden Betrieb ein Datenaustausch mit einem PC erwünscht sein kann.

Vor allem während der Sketch-Entwicklung und bei der Fehlersuche hilft es oft sehr, wenn man sich z.B. bestimmte Werte am PC anzeigen lassen kann oder wenn man Fehlermeldungen im Klartext an den PC senden kann. Aber auch die Ausgabe z.B. von Messwerten an den PC zur weiteren Auswertung oder Speicherung ist oft hilfreich.

Ein Sketch kann dazu den COM:-Port zwischen ftDuino und PC für den Datenaustausch nutzen. Der ftDuino-Beispiel-Sketch ComPort zum Beispiel verwendet den COM:-Port, um ein paar einfache Textausgaben am PC zu erzeugen. Das ComPort-

Beispiel findet sich im **Datei**-Menü der Arduino-IDE unter **Datei > Beispiele > FtduinoSimple > USB > ComPort**. Auch der ComPort-Sketch verwendet keinen der Ausgänge und benötigt daher neben der USB-Verbindung keinerlei weitere Spannungsversorgung.

```

1  /*
2   *      ComPort - Kommunikation mit dem PC über den COM:-Port
3
4  */
5
6 int zaehler = 0;
7
8 void setup() {
9     // Port initialisieren und auf USB-Verbindung warten
10    Serial.begin(9600);
11    while(!Serial);           // warte auf USB-Verbindung
12
13   Serial.println("ftDuino COM:-Port test");
14 }
15
16 void loop() {
17   Serial.print("Zähler: ");      // gib "Zähler:" aus
18   Serial.println(zaehler, DEC);  // gib zaehler als Dezimalzahl aus
19
20   zaehler = zaehler+1;         // zaehler um eins hochzählen
21
22   delay(1000);               // warte 1 Sekunde (1000 Millisekunden)
23 }
```

3.3.1 Der serielle Monitor

Man kann ein beliebiges sogenanntes Terminalprogramm auf dem PC nutzen, um Textausgaben des **ftDuino** via COM:-Port zu empfangen. Die Arduino-IDE bringt praktischerweise selbst ein solches Terminal mit. Es findet sich im Menü unter **Werkzeuge > Serieller Monitor**.

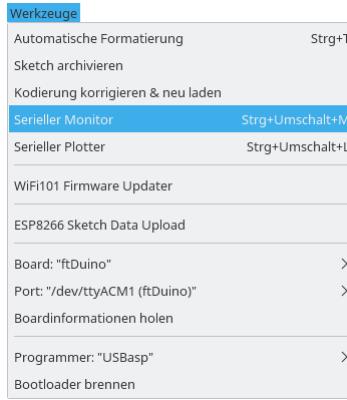


Abbildung 3.10: Der serielle Monitor findet sich im **Werkzeuge**-Menü

Man muss den COM:-Port nicht separat einstellen, sondern es wird der COM:-Port übernommen, der bereits für den Sketch-Download eingestellt wurde.

Nach der Auswahl im Menü öffnet der serielle Monitor ein eigenes zusätzliches Fenster auf dem PC. Wurde der ComPort-Sketch bereits auf den **ftDuino** geladen, dann erscheinen sofort entsprechende Ausgaben, sobald der serielle Monitor geöffnet wurde.

Zeilenenden

Der serielle Monitor hat am unteren Fensterrand eine recht unscheinbare Option, das Zeilenende zu markieren. Für einfache Textausgaben vom **ftDuino** zum PC ist diese Option bedeutungslos. Aber sobald Eingaben vom PC erwartet werden wie

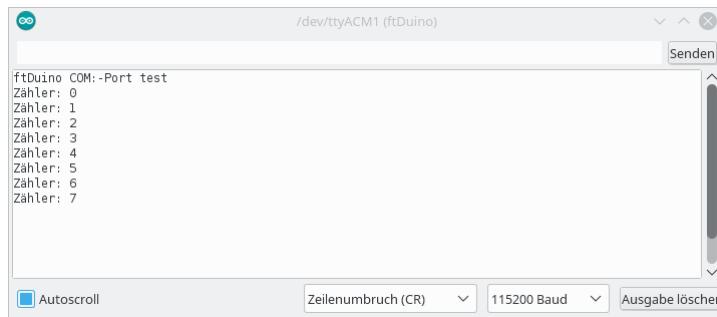


Abbildung 3.11: Der serielle Monitor

zum Beispiel im Modell des Hochregallagers in Abschnitt 7.1 kommt dieser Option eine Bedeutung zu. Die Option muss auf **Neue Zeile** oder **Zeilenumbruch (CR)** stehen, damit die Befehlseingabe klappt.

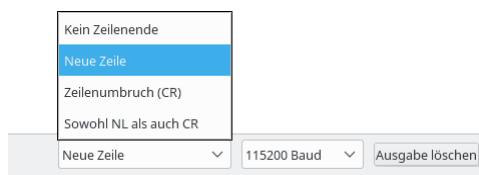


Abbildung 3.12: Einstellung des Zeilenendes

Die Nutzung des COM:-Ports wird automatisch zwischen Sketch-Download und seriellem Monitor geteilt. Man kann also jederzeit bei geöffnetem seriellen Monitor den Sketch-Editor in den Vordergrund holen und einen Download starten. Der serielle Monitor wird dann automatisch für die Zeit des Downloads deaktiviert.

Eine Besonderheit des USB-COM:-Ports die der **ftDuino** vom Arduino Leonardo erbt ist, dass die sogenannte Bitrate (oft auch Baudrate genannt) keine Bedeutung hat. Im ComPort-Beispiel wird in Zeile 10 eine Bitrate von 9600 Bit pro Sekunde eingestellt, in Abbildung 3.11 ist aber unten rechts eine Bitrate von 115200 Bit pro Sekunde eingestellt. Die USB-Verbindung ignoriert diese Einstellungen und kommuniziert trotzdem fehlerfrei. Einige andere Mitglieder der Arduino-Familie wie der Arduino-Uno benötigen hier aber übereinstimmende Einstellungen.

3.3.2 Sketchbeschreibung

Der Sketch besteht aus wenig mehr als den eigentlich Aufrufen zur Bedienung des COM:-Ports. Da der COM:-Port auch oft "serieller Port", englisch "Serial" genannt wird fangen die entsprechenden Funktionsaufrufe alle mit `Serial.` an.

In Zeile 10 der sofort bei Sketchstart aufgerufenen `setup()`-Funktion wird zunächst der COM:-Port für die Kommunikation geöffnet. In Zeile 11 dann wird gewartet, bis der COM:-Port auf PC-Seite verfügbar ist und die erste Kommunikation stattfinden kann. In Zeile 13 wird danach eine erste Startmeldung an den PC geschickt.

Innerhalb der wiederholt durchlaufenden `loop()`-Funktion wird dann in den Zeilen 17 und 18 zunächst der Text "Zähler: " ausgegeben, gefolgt von dem Inhalt der Variablen `zaehler` in Dezimaldarstellung. Die `println()`-Funktion führt nach der Ausgabe einen Zeilenvorschub aus. Die folgende Ausgabe erfolgt daher am Beginn der nächsten Bildschirmzeile.

Schließlich wird in Zeile 20 die `zaehler`-Variable um eins erhöht und eine Sekunde (1000 Millisekunden) gewartet.

3.3.3 USB-Verbindungsaubau

Bei Geräten wie dem Arduino Uno, die einen separaten USB-Kommunikationsbaustein für die USB-Kommunikation nutzen, besteht die USB-Verbindung durchgängig, sobald das Gerät mit dem PC verbunden ist. Beim **ftDuino** sowie beim Arduino Leonardo übernimmt der Mikrocontroller wichtige Aspekte der USB-Kommunikation selbst. Das bedeutet, dass die logische USB-Verbindung jedes Mal getrennt und neu aufgebaut wird, wenn ein neuer Sketch auf den Mikrocontroller übertragen wird.

Beginnt der **ftDuino** direkt nach dem Download mit der Textausgabe auf dem COM:-Port, so gehen die ersten Nachrichten verloren, da die USB-Verbindung noch nicht wieder aufgebaut ist. Daher wartet der Sketch in Zeile 11 darauf, dass die Kommunikationsverbindung zwischen **ftDuino** und PC wieder besteht, bevor die ersten Ausgaben erfolgen.

Man kann testweise diese Zeile einmal löschen oder auskommentieren (Programmcode, der per // in einen Kommentar verwandelt wurde, wird nicht ausgeführt).

```
8 void setup() {  
9     // Port initialisieren und auf USB-Verbindung warten  
10    Serial.begin(9600);  
11    // while(!Serial);      // warte auf USB-Verbindung  
12  
13    Serial.println("ftDuino COM:-Port test");  
14 }
```

Lädt man diesen Sketch nun auf den **ftDuino**, so beginnt die Textausgabe im seriellen Monitor erst ab der Zeile Zähler: 2. Die beiden vorhergehenden Zeilen werden vom **ftDuino** an den PC gesendet, bevor die USB-Verbindung wieder steht und gehen daher verloren. Dieses Verhalten kann trotzdem gewünscht sein, wenn die Ausgabe über USB nur zusätzlich erfolgen soll und der **ftDuino** auch ohne angeschlossenen PC arbeiten soll.

Kapitel 4

Programmierung

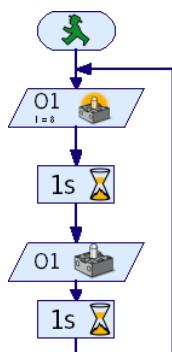
Dieses Kapitel erklärt die Programmierung eigener Programme bzw. Sketches für den **ftDuino**. Wer zunächst keine eigenen Programme schreiben möchte und erst einmal die vorgefertigten Beispiele und Experimente ausführen möchte ohne deren Programmcode zu verstehen kann direkt mit Kapitel 6 weitermachen.

Der **ftDuino** wird mit einer ständig wachsenden Anzahl vorgefertigter Beispiel-Sketches ausgeliefert. Für viele Modelle und Versuche reicht es daher, wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben diese Beispiele auf den **ftDuino** zu laden. Aber wie der Spaß beim Bauen mit fischertechnik gerade dort beginnt, wo man die vorgegebenen Pfade der Bauanleitungen hinter sich lässt, so besteht auch beim **ftDuino** der eigentliche Nutzen darin, dass man ihn mit eigenen Sketches programmieren kann. Zusammen mit einem selbst entworfenen Modell ergeben sich so beeindruckende Möglichkeiten. Und ganz nebenbei lernt man nicht nur die mechanische Grundlagen kennen, sondern erhält zusätzlich einen realistischen Einblick in die Welt der Mikrocontroller-Programmierung.

Dieses Kapitel soll einen ersten Einblick in die Programmierung des **ftDuino** geben. Es werden die wesentlichen Sprachkonstrukte der auf dem **ftDuino** verwendeten Programmiersprache soweit erklärt, wie sie zum Verständnis der Programme der nachfolgenden Kapitel benötigt werden. Die Beschreibung beschränkt sich bewusst auf das allernötigste. Trotzdem sind Ende dieses recht kurzen Kapitels alle nötigen Grundlagen für erste eigene Sketches vorhanden.

4.1 Textbasierte Programmierung

Im Gegensatz zu den meisten Programmierumgebungen aus der Welt der Konstruktionsspielzeuge wird der Arduino nicht grafisch sondern textbasiert programmiert. Während die grafischen Umgebungen wie fischertechniks RoboPro oder Legos EV3-Programmier-App auf leichte Erlernbarkeit ausgelegt sind steht in der Arduino-IDE der Praxisbezug im Vordergrund. Arduino zu programmieren bedeutet auf die gleiche Art Programme zu schreiben, wie es auch professionelle Entwickler kommerzieller Produkte machen.



(a) grafisch

```
#include <FtduinoSimple.h>
void setup() {
}

void loop() {
    ftduino.output_set(Ftduino::O1, Ftduino::HI);
    delay(1000);
    ftduino.output_set(Ftduino::O1, Ftduino::LO);
    delay(1000);
}
```

(b) textbasiert

Abbildung 4.1: Blinken einer Lampe an Ausgang O1

Tatsächlich hat die textuelle Darstellung einige signifikante Vorteile. Vor allem bei großen Projekten ist eine ansprechend formatierte textuelle Darstellung daher wesentlich verständlicher als eine grafische.

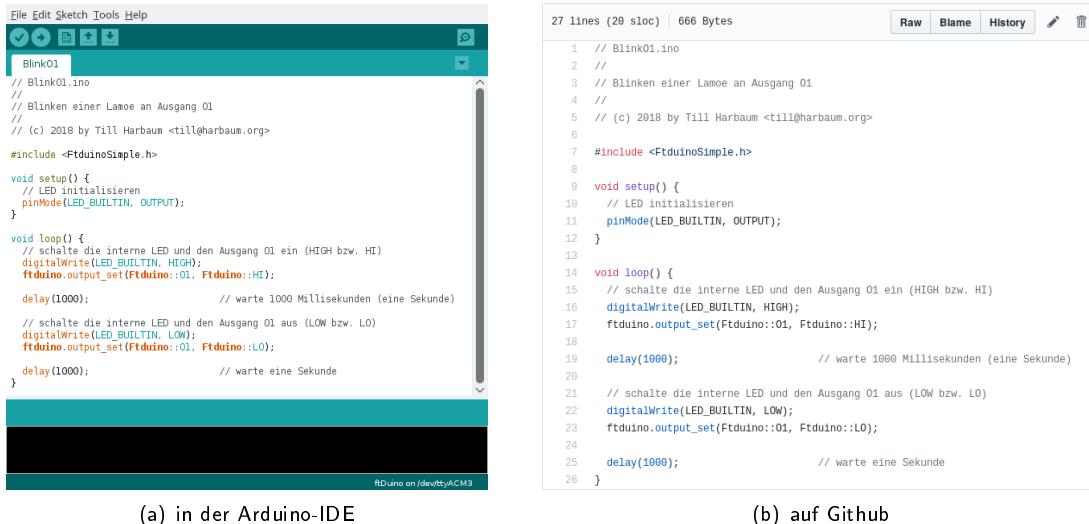


Abbildung 4.2: Darstellung des gleichen Arduino-Sketches

Ein textbasiertes Programm besteht aus unformatiertem Text. Einige Programmierumgebungen wie die Arduino-IDE lassen dennoch farbige Hervorhebungen oder unterschiedliche Schriftgrößen zu oder zeigen im Programmtext Zeilenummern an. Im Gegensatz zu Texten aus einer Textverarbeitung sind diese Formatierungen aber nicht Teil des erstellten Programms. Stattdessen sind sie Teil der Programmierumgebung selbst und die Formatierung geht z.B. bei der Weitergabe des Programmcodes verloren. Der gleiche Programmcode kann daher in einer anderen Umgebung vollkommen anders aussehen. Für die Funktion des Programms ist das bedeutungslos. Es kommt nicht darauf an wie der Programmtext dargestellt wird. Für die eigentliche Programmfunction ist ausschließlich der Inhalt des dargestellten Texts verantwortlich, nicht sein Aussehen.

Wie in Abbildung 4.2 zu sehen unterscheidet sich die Darstellung des identischen Programmcodes zwischen der Arduino-IDE und z.B. dem Web-Dienst Github deutlich.

Auch dieses Handbuch verwendet eine eigene Darstellung und stellt zum Beispiel manchmal Zeilenummern dar. Diese Zeilenummern dienen nur der leichteren Bezugnahme auf einzelne Zeilen und dürfen nicht als Teil des Programms explizit eingegeben werden:

```

1 // Blink01.ino
2 //
3 // Blinken einer Lampe an Ausgang 01
4 //
5 // (c) 2018 by Till Harbaum <till@harbaum.org>
6
7 #include <FtduinoSimple.h>
8
9 void setup() {
10    // LED initialisieren
11    pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
12 }
13
14 void loop() {
15    // schalte die interne LED und den Ausgang 01 ein (HIGH bzw. HI)
16    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
17    ftduino.output_set(Ftduino::01, Ftduino::HI);
18
19    delay(1000);           // warte 1000 Millisekunden (eine Sekunde)
20
21    // schalte die interne LED und den Ausgang 01 aus (LOW bzw. LO)
22    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
23    ftduino.output_set(Ftduino::01, Ftduino::LO);
24
25    delay(1000);           // warte eine Sekunde
26 }
```

Wer auch in der Arduino-IDE Zeilennummern dargestellt bekommen möchte kann sie in den Voreinstellungen der Arduino-IDE wie in Abbildung 4.3 dargestellt aktivieren.

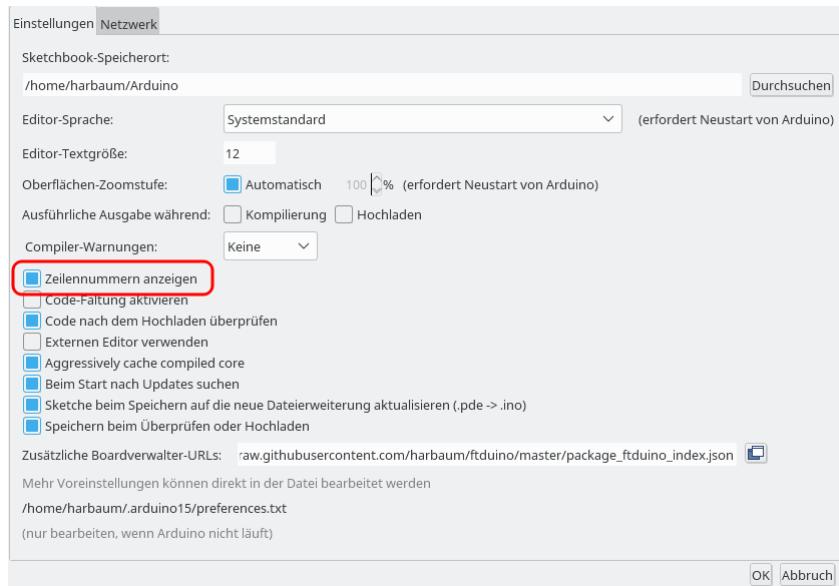


Abbildung 4.3: Aktivierung von Zeilennummern in der Arduino-IDE

4.2 Die Programmiersprache C++

Arduinos und der **ftDuino** werden in der Programmiersprache C++, genauer dem Standard C++11 programmiert. Ein Arduino-Sketch unterscheidet sich in einigen wenigen fundamentalen Dingen von klassischen C++-Programmen, davon abgesehen entspricht die Programmierung dem Standard. Die Programmiersprache C++ ist in der professionellen Softwareentwicklung weit verbreitet. Große Teile aller gängigen Betriebssysteme wie Windows, Linux oder MacOS sind in C++ bzw. einer eng mit C++ verwandten Programmiersprache geschrieben. Die Arduino-Programmierung liefert dadurch einen realistischen Einblick in den professionellen Bereich.

Die Sketches genannten C++-Programme der Arduino-Welt werden durch ein Compiler genanntes Programm in sogenannten Maschinen- oder Binärkode übersetzt, der vom Mikrocontroller des Arduino bzw. **ftDuino** verstanden wird. Dieser Binärkode kann dann auf den **ftDuino** per Download übertragen werden.

Der Compiler, der von der Arduino-IDE verwendet wird ist der sogenannte GCC¹. Dieser Compiler findet auch in der Industrie Verwendung und wird unter anderem zur Übersetzung des Linux-Kernels verwendet, wie er auf jedem Android-Smartphone zum Einsatz kommt. Es handelt sich bei der Arduino-IDE und deren intern verwendeten Werkzeugen also keinesfalls um reine Hobby-Technik. Unter der anfängertauglichen Oberfläche verbergen sich im Gegenteil leistungsfähige und professionelle Komponenten.

4.3 Grundlagen

Ein Arduino-Sketch besteht aus einer textuellen Beschreibung. Der minimale Text, der einen gültigen Sketch bildet sieht folgendermaßen aus:

```
void setup() {
}

void loop() {
```

¹GNU-Compiler-Collection GCC: <https://gcc.gnu.org/>

Um diesen Sketch einzugeben öffnet man zunächst die Arduino-IDE und wählt dann im Menü `Datei > Neu`. Es öffnet sich ein neues Fenster, das genau die vorher abgebildeten Zeilen bereits enthält. Zusätzlich sind noch zwei mit `//` beginnende Zeile vorhanden. Diese können entfernt werden, sodass der Text am Ende exakt dem obigen Beispiel entspricht.

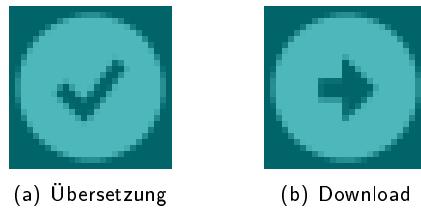


Abbildung 4.4: Schaltflächen der Arduino-IDE

Dieser minimale Sketch lässt sich in der Arduino-IDE erfolgreich übersetzen und auf den `ftDuino` laden. Dazu gibt es in der Arduino-IDE die beiden in Abbildung 4.4 dargestellten Schaltflächen. Eine Fläche startet die Übersetzung in Maschinencode. Diese Funktion benötigt keinen angeschlossenen `ftDuino` und mit ihr lässt sich schnell feststellen, ob ein Sketch keine fundamentalen Fehler enthält, die bereits die Übersetzung verhindern. Die zweite Schaltfläche startet den Download auf den `ftDuino`. Sollte der Sketch noch nicht übersetzt sein, so wird bei Klick auf die Download-Schaltfläche vorher noch automatisch die Übersetzung gestartet. Nur wenn diese Übersetzung erfolgreich ist wird der Download begonnen.

Hat man den Sketch per `Datei > Neu` frisch angelegt, so wird einen die Arduino-IDE nun ggf. fragen, ob man den Sketch speichern möchte. Wenn man dem Speichern zustimmt kann man an dem Sketch später jederzeit weiter arbeiten.

Nach dem erfolgreichen Download wird der `ftDuino` keine sichtbare Reaktion zeigen. Der Sketch besteht aus zwei sogenannten Funktionen, eine mit dem Namen `setup()` und eine mit dem Namen `loop()`. Diese Funktionen bilden das Skelett eines jeden Arduino-Sketches. Sie enthalten jeweils in ein Paar geschweifter Klammern `{` und `}` eingebettete Anweisungen, die eigentliche Funktionalität des Sketches beschreiben. Aufeinanderfolgende Anweisungen werden dabei per Semikolon `(;)` getrennt.

Befinden sich aber wie in diesem einfachen Beispiel überhaupt keine Anweisungen zwischen den Klammern, so löst der Sketch folgerichtig auch keine erkennbare Reaktion auf dem `ftDuino` aus.

4.3.1 Kommentare

Die beiden zunächst entfernten mit `//` beginnenden Zeilen fügen dem Sketch ebenfalls keine Funktionalität zu. Um das zu überprüfen kann man noch einmal `Datei > Neu` auswählen und den Sketch diesmal unverändert lassen:

```
void setup() {
    // put your setup code here, to run once:
}

void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:
}
```

Ein erneuter Klick auf den Download-Button wird auch diesen Sketch übersetzen und auf den `ftDuino` laden. Wieder erfolgt am `ftDuino` keine erkennbare Funktion. Das liegt daran, dass die beiden zusätzlichen Zeilen reine Kommentarzeilen sind. Sie sind dazu gedacht, einem menschlichen Leser zusätzliche Erklärungen zu geben. Für die Übersetzung in Maschinencode sind diese Zeilen bedeutungslos. Alles, was in einer Zeile hinter den doppelten Schrägstrichen `//` steht wird bei der Erzeugung des Maschinencodes ignoriert.

Zusätzlich kann man Kommentare in `/*` und `*/` einschließen. Die Erzeugung von Maschinencode beginnt erst wieder hinter dem schließenden Element `*/`. Außerdem dürfen Kommentare dieser Art über mehrere Zeilen gehen.

```
void setup() {
    /* mehrzeilige Kommentare
       sind auch möglich */
}
```

Einen Hinweis auf Kommentare gibt in der Arduino-IDE die Farbgebung. Kommentare sind immer hellgrau dargestellt und damit leicht vom eigentlichen Programmcode zu unterscheiden.

4.3.2 Fehlermeldungen

Als nächstes sollen zwei Programmanweisungen zwischen den geschweiften Klammern der `setup()`-Funktion eingefügt werden:

```
1 void setup() {
2     pinnMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
3     digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
4 }
5
6 void loop() {
7 }
```

Was diese beiden kryptischen Zeilen genau bedeuten wird später erklärt werden. Zunächst soll der Sketch lediglich wieder übersetzt und auf den **ftDuino** geladen werden. Ist das Programm fehlerfrei übersetzbbar, so wird es erneut auf den **ftDuino** übertragen.

Leider ist es in diesem Fall aber nicht fehlerfrei. Wurde das Programm exakt wie abgebildet eingegeben, so sollte die Übersetzung des Programms mit der in Abbildung 4.5 zu sehenden Fehlermeldung abbrechen.



Abbildung 4.5: Anzeige eines Übersetzungsfehlers

im oberen Teil des Bildschirms wird die fehlerhafte Codezeile hervorgehoben. Im unteren Teil des Fensters sind die Ausgaben des GCC-Compilers zu sehen. Die eigentliche Fehlermeldung lautet `'pinnMode' was not declared in this scope`.

Damit teilt der Compiler mit, dass er mit dem Begriff `pinnMode` nichts anfangen kann. Schon bei der Eingabe des Sketches gab es einen Hinweis auf dieses Problem, denn die Anweisung `pinnMode` wurde bei der Eingabe in der IDE lediglich schwarz dargestellt während z.B. in der zweiten Zeile das Wort `digitalWrite` orange hervorgehoben wurde. Die Arduino-IDE färbt die meisten ihr bekannten Anweisungen ein und ein nicht-gefärbter Teil kann einen Hinweis auf einen Fehler sein.

Tatsächlich hat sich hier ein Fehler eingeschlichen und statt `pinnMode` hätte es `pinMode` heißen müssen. Ändert man das Wort entsprechend, so färbt die IDE es erwartungsgemäß orange ein, die Übersetzung gelingt und ein Download ist möglich. Der korrigierte Sketch sollte nun wie folgt aussehen.

```
1 void setup() {
2     pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
3     digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
4 }
5
6 void loop() {
7 }
```

Nach dem Download wird die rote Leuchtdiode im **ftDuino** leuchten, denn genau das bewirken die zwei kryptischen Zeilen, die im folgenden Abschnitt genauer erklärt werden.

4.3.3 Funktionen

Das im Rahmen der Arduino-Programmierung wichtigste C++-Sprachelement sind die sogenannten Funktionen. Mit ihnen lassen sich bereits sinnvolle einfache Programm-Sketches schreiben.

Funktionsdefinitionen fassen Anweisungen zusammen. Das folgende Programmfragment zeigt die Definition einer Funktion namens `name`, die in ihrem Funktionskörper die beiden Anweisungen `anweisung1` und `anweisung2` enthält. Anweisungen werden durch das Semikolon ; voneinander getrennt.

```
void name() {
    anweisung1;
    anweisung2;
}
```

Eine Funktion wird in der Regel genutzt, um alle für eine komplexe Aufgabe benötigten Anweisungen zusammenzufassen und einen passenden Namen zu geben. Die Anweisungen im Körper einer Funktion werden nacheinander von oben nach unten ausgeführt. In diesem Fall wird also erst `anweisung1` ausgeführt und dann `anweisung2`.

Da die Ausführung der einzelnen Anweisungen je nach Komplexität nur wenige Mikrosekunden dauert entsteht oft der Eindruck, als würden Dinge gleichzeitig passieren. Tatsächlich werden alle Anweisungen aber der Reihe nach ausgeführt. Dementsprechend können auch widersprüchliche Anweisungen konfliktfrei untereinander stehen und beispielsweise eine Lampe ein- und unverzüglich danach wieder ausgeschaltet werden. Diese Ereignisse passieren so kurz nacheinander, dass der Anwender nicht erkennen kann, dass z.B. eine Leuchtdiode für wenige Mikrosekunden eingeschaltet war.

Die Ausführung der Anweisungen kann direkt etwas bewirken und z.B. eine Leuchtdiode am **ftDuino** aufleuchten lassen. Eine Funktion, die alle Anweisungen zum Einschalten der Leuchtdiode zusammenfasst könnte z.B. wie folgt aussehen.

```
void SchalteLeuchtdiodeEin() {
    pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);      // schalte Pin auf Ausgang
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);   // setze Ausgangspin auf 'high'
}
```

Eine Funktion in der Sprache C++ ist sehr nah an mathematische Funktionen angelehnt und kann wie diese ein Ergebnis liefern. Ob und was für ein Ergebnis die Funktion zurück liefert steht vor dem Funktionsnamen. Im vorliegenden Fall soll kein Ergebnis geliefert werden, daher steht vor dem Funktionsnamen `void`, englisch für "nichts". Außerdem kann eine Funktion einen oder mehrere zu verarbeitende Eingabewerte erhalten, die zwischen den runden Klammern () angegeben werden. Die vorliegende Funktion benötigt keine Eingabewerte, die Klammern bleiben also leer.

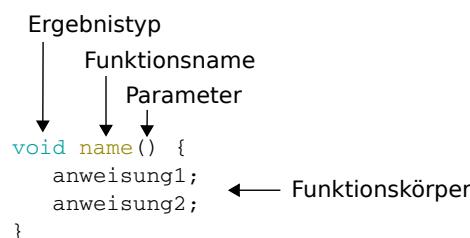


Abbildung 4.6: Funktionsdefinition

Die Definition einer Funktion bewirkt, dass der Compiler die entsprechenden Anweisungen übersetzt und die nötigen Maschinbefehle hintereinander im Maschinencode ablegt. Damit ist aber noch nichts darüber gesagt, wann diese Anweisungen tatsächlich ausgeführt werden.

Ausgeführt werden die Anweisungen der Funktion, sobald die Funktion aufgerufen wird. Dazu muss lediglich der Funktionsname mit den Parametern als Anweisung eingegeben werden. Da die Funktion `SchalteLeuchtdiodeEin` keine Parameter erwartet bleibt der Bereich zwischen den runden Klammern beim Aufruf leer. Der Funktionsaufruf muss dabei selbst wieder im Funktionskörper einer Funktionsdefinition stehen.

```
void setup() {
    SchalteLeuchtdiodeEin();
}
```

Damit wird klar, dass die Anweisungen `pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);` und `digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);` ebenfalls Funktionsaufrufe waren. Beide Funktionen bekamen jeweils zwei durch Kommata getrennte Parameter mitgegeben.

4.3.4 Die Funktionen `setup()` und `loop()`

<https://www.arduino.cc/reference/en/language/structure/sketch/setup/>
<https://www.arduino.cc/reference/en/language/structure/sketch/loop/>

Wenn Funktionen selbst immer nur aus anderen Funktionen aufgerufen werden dürfen ergibt sich ein Henne-Ei-Problem bei der Frage, von wo aus denn der erste Funktionsaufruf erfolgt.

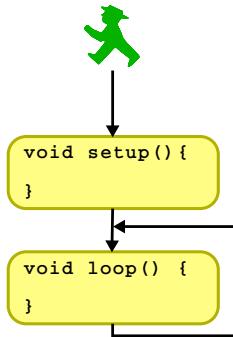


Abbildung 4.7: Ablauf eines Sketches

An dieser Stelle kommen die beiden Funktionsdefinitionen `setup()` und `loop()` ins Spiel, über die jeder Sketch mindestens verfügen muss. Fehlt eine oder beide Definitionen, so bricht die Arduino-IDE die Übersetzung mit einer Fehlermeldung ab.

Beiden Funktionen müssen nicht explizit aufgerufen werden. Stattdessen wird ihr Aufruf von der Arduino-IDE während der Übersetzung des Sketches automatisch in den erzeugte Maschinencode eingefügt. Die Funktion `setup()` wird dabei einmal bei Sketch-Start aufgerufen und die Funktion `loop()` wird in Folge immer wieder aufgerufen wie in Abbildung 4.7 dargestellt.

Mit Sketch-Start ist im Falle des **ftDuino** eine von drei Situationen gemeint:

1. Direkt nach dem Download eines übersetzten Sketches wird dessen Code gestartet.
2. Nach dem Anlegen der Stromversorgung an den **ftDuino** wird ein vorher per Download installierter Sketch-Code gestartet.
3. Wurde der Bootloader des **ftDuino** durch Druck auf den Reset-Taster gestartet, so bleibt dieser für acht Sekunden aktiviert. Wird der Bootloader in dieser Zeit nicht vom PC aus angesprochen, so beendet sich der Bootloader und der zuletzt heruntergeladene Sketch-Code wird stattdessen gestartet.

Hinweis für erfahrene Nutzer

Wer schon einmal mit C++ auf einem PC oder ähnlich zu tun hatte wird an dieser Stelle ggf. überrascht sein. In jenem Fall gab es die speziellen Funktionen `setup()` und `loop()` nicht. Stattdessen gab es eine Funktion namens `main()`, die bei Programmstart automatisch aufgerufen wurde.

Die Entwickler der Arduino-IDE haben sich entschieden, an dieser Stelle vom üblichen Standard abzuweichen, da das Konzept der `main()`-Funktion eher für nur zeitweilig auf einem komplexen Computer laufende Programme entwickelt wurde und sich nur bedingt in die Welt der Hardware-Programmierung einfügt.

Bibliotheksfunktionen

Wie im Falle der `name()`-Funktion geschehen kann man eigene Funktionen schreiben. Die Arduino-IDE bringt aber bereits eigene Funktionssammlungen mit. Die Sammlungen bestehen in erster Linie aus häufig benötigten universellen Funktionen.

Sie sind dem System von vornherein mit Namen bekannt und man kann sie in eigenen Programmen einfach aufrufen, ohne sie selbst definieren zu müssen.

Die Funktionen `pinMode()` und `digitalWrite()` sind solche Bibliotheksfunktionen. Während die Sprache C++ universell ist und sich bei der Verwendungen auf einem PC oder einem Arduino nicht unterscheidet sind die Bibliotheksfunktionen in der Regel plattformspezifisch. Die Funktion `pinMode()` steht dem Programmierer nur auf dem Arduino zur Verfügung und bei der Entwicklung eines Programms für einen Windows-PC würde der Aufruf dieser Funktion zu einem Übersetzungsfehler führen.

Dies ist auch der Grund, warum sich viele C++-Beispiele und Tutorials aus dem Internet nicht direkt auf den Arduino übertragen lassen. Handelt es sich bei diesen Programmen nicht zufällig bereits um Arduino- sondern um PC-Programme, dann werden dort Funktions-Bibliotheken verwendet, die wiederum auf dem Arduino nicht vorhanden sind. Das liegt in erster Linie an der deutlich unterschiedlichen Hardware der verschiedenen Plattformen. Während ein PC-Programm in erster Linie Fenster auf dem Bildschirm öffnet und mit Benutzereingaben umgeht wird ein Arduino-Programm eher Hardware-Eingänge auswerten und Ausgänge schalten.

Hinweis für erfahrene Nutzer

Auch bei der Verwendung von Bibliotheken gibt es einen Unterschied zu üblicher C++-Programmierung auf PCs. Die Arduino-IDE macht die grundlegenden Arduino-spezifischen Bibliotheken automatisch im Sketch bekannt, so dass sich Funktionen wie `pinMode()` direkt nutzen lassen.

Gängige C++-Compiler binden von sich aus keine Bibliotheken ein. Sie müssen durch sogenannte `#include`-Anweisungen explizit bekannt gemacht werden. Dies ist auf dem Arduino zumindest für die meisten mitgelieferten Bibliotheken nicht nötig.

4.3.5 Beispiel

Damit sind die wesentlichen Grundlagen erklärt und das folgende Beispiel verständlich.

```

1  /* Funktion zum Einschalten der LED */
2  void SchalteLedEin() {
3      pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
4      digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
5  }
6
7  void setup() {
8      SchalteLedEin();
9  }
10
11 void loop() {
12 }
```

Bei Systemstart wird zunächst die `setup()`-Funktion aufgerufen. Die Funktion `setup()` enthält eine einzelne Anweisung in Form eines Aufrufs der Funktion `SchalteLedEin`. Diese Funktion ist wiederum in den Zeilen 2 bis 5 des Sketches definiert und besteht ihrerseits aus dem Aufruf zweier Bibliotheksfunktionen, die die eingebaute Leuchtdiode des `ftDuino` aufleuchten lassen.

Die `loop()`-Funktion wird nach Systemstart permanent immer wieder aufgerufen. Sie ist aber leer, über das Einschalten der Leuchtdiode direkt bei Systemstart zeigt der Sketch also keine weitergehende Funktion.

Der Kommentar in Zeile eins dient lediglich der Erklärung und hat keinen Einfluss auf die Übersetzung des Sketches oder seine Funktion.

4.4 Hilfreiche Bibliotheksfunktionen

Wie in den vorigen Abschnitten angedeutet bringt die Arduino-IDE einige Bibliotheken mit, die Funktionen zur Verwendung spezieller Eigenschaften des Arduino bieten. Zusätzlich bringt die `ftDuino` Installation eigene Bibliotheken mit, um auf die fischertechnik-Ein- und -Ausgänge des `ftDuino` zuzugreifen.

Im folgenden werden sieben der am häufigsten benötigten Funktionen beschrieben. Mit ihnen lassen sich bereits vielfältige Sketches schreiben.

Eine Beschreibung weiterer Funktionen der Arduino-IDE findet man online in der Arduino-Language-Reference unter <https://www.arduino.cc/reference/en/#functions> während weitere ftDuino-spezifische Funktionen im Kapitel 9 beschrieben sind.

4.4.1 pinMode(pin, mode)

<https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/digital-io/pinMode/>

Diese Funktion konfiguriert einen Pin des ATmega32u4-Mikrocontrollers als Ein- (`mode = INPUT`) oder Ausgang (`mode = OUTPUT`). Diese Funktion wird auf Arduinos sehr häufig verwendet, da dort direkt mit den Anschlüssen des Mikrocontrollers gearbeitet wird. Auf dem ftDuino befinden sich an den meisten Anschlüssen Zusatzschaltungen zur Verbindung mit fischertechnik-Komponenten, die die direkte Verwendung der `pinMode()`-Funktion unnötig machen. Stattdessen bringen die ftDuino-Bibliotheken alle Funktionen mit, um die Ein- und Ausgänge fischertechnik-konform zu bedienen.

Die wesentliche Ausnahme bildet der Anschluss der internen roten Leuchtdiode. Für `pin` muss in dem Fall `LED_BUILTIN` verwendet werden.

```
// internen Anschlusspin der Leuchtdiode zum Ausgang erklären
pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
```

4.4.2 digitalWrite(pin, value)

<https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/digital-io/digitalwrite/>

Die Funktion `digitalWrite()` steuert einen durch die Funktion `pinMode()` zum Ausgang erklärt Pin. Sie wird daher im ftDuino in der Regel für die Leuchtdiode verwendet und in seltenen Fällen zur Steuerung der beiden am I²C-Anschluss verfügbaren Signale.

Für `pin` gelten die gleichen Werte wie bei `pinMode()`-Funktion. Der Wert für `value` kann `HIGH` oder `LOW` sein, was den entsprechenden Pin ein- oder ausschaltet.

```
// internen Anschlusspin der Leuchtdiode zum Ausgang erklären
pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
// Leuchtdiode einschalten
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
```

4.4.3 delay(ms)

<https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/time/delay/>

Die meisten Aufgaben erledigt auch ein so einfacher Mikrocontroller wie der ATmega32u4 schneller als für Menschen wahrnehmbar. Um Abläufe auf ein passendes Maß zu senken ist die `delay()`-Funktion hilfreich. Sie erwartet als Parameter eine Wartezeit in Millisekunden.

Wie in Abschnitt 4.3.4 beschrieben wird die Funktion `setup()` nur einmal aufgerufen, die Function `loop()` aber daraufhin immer wieder. Der folgende Sketch lässt die Leuchtdiode daher kontinuierlich blinken.

```
void setup() {
    // internen Anschlusspin der Leuchtdiode zum Ausgang erklären
    pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

void loop() {
    // Leuchtdiode einschalten
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
    // 1 Sekunde warten
    delay(1000);
    // Leuchtdiode ausschalten
    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
    // 1 Sekunde warten
}
```

```
    delay(1000);
}
```

4.4.4 Serial.begin(speed)

<https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/serial/begin/>

Die Kommunikationsmöglichkeiten des **ftDuino** beschränken sich direkt am Gerät im Wesentlichen auf die fischertechnik Ein- und Ausgänge. Bei komplexeren Projekten wird es schwierig, nur am Verhalten des **ftDuino** den Programmfluss zu verfolgen. Ein einfacher Weg, aus dem Sketch heraus Informationen an den Benutzer auszugeben ist die Verwendung der Serial-Bibliothek.

Auf PC-Seite werden die Ausgaben dieser Bibliothek über den sogenannten seriellen Monitor angezeigt. Dessen Benutzung wurde in Abschnitt 3.3.1 genauer beschrieben. Die Funktion **Serial.begin()** bereitet den Sketch auf die Verwendung des seriellen Monitors vor. Sie sollte daher am Beginn des Sketches bzw. in der **setup()**-Funktion aufgerufen werden.

Die Funktion **Serial.begin()** erwartet einen Parameter namens **speed**. Dieser Wert ist für die USB-Verbindung des **ftDuino** belanglos und sollte z.B. auf einen Wert von 115200 gesetzt werden.

```
void setup() {
  // Vorbereiten der seriellen Verbindung
  Serial.begin(115200);
}

void loop() {
```

4.4.5 Serial.print(val) und Serial.println(val)

<https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/serial/print/>
<https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/serial/println/>

Ist eine serielle Verbindung per **Serial.begin()** eingerichtet, so können die Funktionen **Serial.print()** und **Serial.println()** zur Ausgabe von Nachrichten an den seriellen Monitor verwendet werden. Der Unterschied zwischen **Serial.print()** und **Serial.println()** liegt darin, dass nach der Ausgabe per **Serial.println()** eine neue Ausgabezeile begonnen wird, während weitere Ausgaben nach **Serial.print()** direkt in der gleichen Zeile erfolgen. Die Funktion **Serial.println()** wird daher oft genutzt, um komplexere Ausgaben abzuschließen.

Für **val** können unter anderem Zeichenketten und Zahlen verwendet werden. Zeichenketten müssen in doppelte Anführungszeichen ("") eingeschlossen werden.

```
void setup() {
  // Vorbereiten der seriellen Verbindung
  Serial.begin(115200);
  // 2 Sekunden Verzögerung, um dem PC Zeit zu geben,
  // die Verbindung entgegen zu nehmen
  delay(2000);
  // ein paar Ausgaben
  Serial.print("Die Antwort lautet: ");
  Serial.println(42);
}

void loop() {
```

4.4.6 ftduino.input_get(), ftduino.output_set() und ftduino.motor_set()

Ein Controller für ein fischertechnik-Modell muss natürlich Eingaben aus dem Modell empfangen und Reaktionen im Modell auslösen können. Die **ftDuino**-Bibliotheken sind in allem Detailgrad in Kapitel 9 beschrieben. In diesem Absatz wird daher nur das absolute Minimum beschrieben.

Es wurde in Abschnitt 4.3.4 erklärt, dass es eine Besonderheit ist, dass Bibliotheksfunktionen ohne weitere Vorbedingungen zur Verfügung stehen und im Sketch verwendet werden können. Dies trifft aber nur auf die Arduino-eigenen Bibliotheken zu wie sie in den bisherigen Beispielen verwendet wurden. Die **ftDuino**-Bibliotheken stehen nicht automatisch zur Verfügung sondern müssen am Anfang des Sketches mit einer `#include`-Anweisung bekannt gemacht werden.

```
#include <FtduinoSimple.h>

void setup() {
}

void loop() {
```

Erst dann sind die Funktionen aus dieser Bibliothek im Sketch nutzbar.

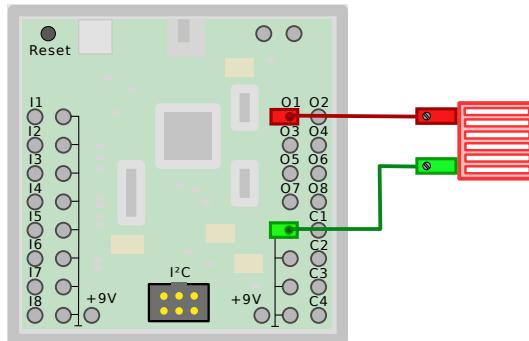


Abbildung 4.8: Lampe an Ausgang O1

Die wichtigsten Funktionen dafür sind `ftduino.input_get(port)` zum Abfragen eines Eingangs und `ftduino.output_set(port, mode)` zum Schalten eines Ausgangs. Bei `ftduino.input_get(port)` sind für port Werte von `Ftduino::I1` bis `Ftduino::I8` erlaubt. Zum Schalten eines Ausgangs gibt es die Funktion `ftduino.output_set(port, mode)`, wobei port Werte von `Ftduino::O1` bis `Ftduino::O8` annehmen darf und mode auf `Ftduino::HI` gesetzt wird, wenn der Ausgang eingeschaltet werden soll und auf `Ftduino::OFF` gesetzt wird, um den Ausgang auszuschalten.

```
#include <FtduinoSimple.h>

void setup() {
    // Eingang I1 lesen
    ftduino.input_get(Ftduino::I1);
    // Ausgang O1 einschalten
    ftduino.output_set(Ftduino::O1, Ftduino::HI);
}

void loop() {
```

Dieser Sketch würde eine wie in Abbildung 4.8 angeschlossene Lampe zum Leuchten bringen. Achtung: Dazu muss der **ftDuino** mit 9 Volt versorgt sein.

Die Funktion `ftduino.motor_set(port, mode)` ist `ftduino.output_set(port, mode)` sehr ähnlich, nur dass hier ein Motorausgang M1 bis M4 geschaltet werden kann. Der Wert for mode kann dann `Ftduino::LEFT`, `Ftduino::RIGHT` oder `Ftduino::OFF` sein, je nachdem, ob sich der Motor linksherum, rechtsherum oder gar nicht drehen soll.

```
#include <FtduinoSimple.h>

void setup() {
    // Eingang I1 lesen
    ftduino.input_get(Ftduino::I1);
    // Motor an M1 linksdrehend einschalten
    ftduino.motor_set(Ftduino::M1, Ftduino::LEFT);
}

void loop() {
```

4.5 Variablen

<https://www.arduino.cc/reference/en/#variables>

Oft besteht der Bedarf in einem Sketch etwas zu "merken" bzw. zu speichern. Wenn etwas beispielsweise mit einer bestimmten Häufigkeit passieren soll, dann muss währenddessen irgendwo vermerkt werden, wie oft es schon passiert ist bzw. wie oft es noch zu passieren hat. Ein anderes Beispiel sind einmalige Ereignisse wie "der Benutzer hat einen Taster gedrückt". Auch wenn dieses Ereignis vorübergeht und der Benutzer den Taster losgelassen hat soll die Aktion ggf. weitergeführt werden. Dazu muss irgendwo vermerkt werden, dass der Taster vor kurzem noch gedrückt war.

Für diesen Zweck gibt es sogenannte Variablen. Mit ihnen weist man den Compiler an, Platz im Speicher des **ftDuino** für etwas "gemerktet" zu reservieren. Während der Sketch im sogenannten Flash-Speicher des **ftDuino** abgelegt wird und daher auch über das Ausschalten des **ftDuino** hinaus erhalten bleibt. Wird der Speicherplatz für Variablen im flüchtigen RAM-Speicher des **ftDuino** abgelegt. Der gespeicherte Wert einer Variablen geht also beim Ausschalten des **ftDuino** verloren.

Eine Variable wird wie eine Funktion im Sketch definiert. Dazu erhält sie wie eine Funktion einen Namen. Außerdem muss angeben werden, welcher Art die in der Variablen abzulegenden Daten sind. Im folgenden Beispiel wird eine Variable namens `variablenName` für Daten vom Typ `int` angelegt.

```
int variablenName;

void setup() {
}

void loop() {
```

4.5.1 Datentyp int

<https://www.arduino.cc/reference/en/language/variables/data-types/int/>

Der Datentyp `int` ist der Standard-Datentyp. Beim **ftDuino** erlaubt dieser Datentyp das Ablegen ganzzahliger Werte im Bereich von -32768 bis +32767. Für die meisten Verwendungen ist das ausreichend.

Eine Variable wird genutzt, um Daten in ihr abzulegen und später wieder abzurufen. Das Ablegen von Werte geschieht, indem der Variablen ein Wert mit dem Gleichheitszeichen (=) zugewiesen wird. Die Ausdrücke auf der rechten Seite der Zuweisung können komplexe mathematische Funktionen beinhalten und sogar Funktionsaufrufe, um beispielsweise den Zustand eines Eingangs des **ftDuino** zu speichern.

```
// eine einfache Zuweisung
variablenName = 42;
// ein komplexer Ausdruck
variablenName = (4*8*8+38)/7;
// Zustand des Eingangs I1
variablenName = ftduino.input_get(Ftduino::I1);
```

Außerdem können in den Ausdrücken wiederum Variablen enthalten sein. Dabei kann auch die auf der linken Seite stehende Variable auch auf der rechten Seite auftauchen, was dem mathematischen Verständnis einer Gleichung etwas widerspricht.

```
// Wert aus einer anderen Variable übernehmen
variablenName = andererVariablenName;
// Wert der Variablen verändern und wieder der Variablen zuweisen
variablenName = variablenName + 1;
```

Man darf diese Art der Zuweisung nicht als mathematischen Vergleich lesen, auch wenn die Darstellung das nahelegt. Stattdessen wird zunächst der Ausdruck auf der rechten Seite berechnet und das Ergebnis wird danach der Variablen auf der linken Seite zugewiesen. Dieser zeitliche Ablauf führt dazu, dass eine Zuweisung wie

```
variablenName = variablenName + 1;
```

einen Sinn ergibt.

Variablen können auch als Parameter bei Funktionsaufrufen verwendet werden.

```

int variablenName;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  variablenName = 192/4;

  Serial.print("Variableninhalt: ");
  Serial.println(variablenName);
}

void loop() {
}

```

Wichtig ist hier die korrekte Verwendung der Anführungszeichen (""). Ein Wort oder Text in Anführungszeichen steht für den Text selbst und wird nicht weiter interpretiert. Ein Wort ohne Anführungszeichen kann u.a. für eine Anweisung, einen Funktionsnamen oder einen Variablenamen stehen und der Compiler versucht diesem Wort eine Bedeutung zuzuweisen.

```

// gib das Wort variablenName aus
Serial.println("variablenName");
// gib den Inhalt der Variablen namens variablenName aus
Serial.println(variablenName);

```

4.6 Bedingungen

Bisher haben alle Beispiele aus Anweisungen in einer festen Reihenfolge bestanden. Alle Anweisungen wurden immer auf die gleiche Weise ausgeführt und z.B. Leuchtdioden haben geblinkt oder Meldungen wurden ausgegeben. Es ist aber zu keiner Zeit etwas abhängig von irgendeinem anderen Ereignis passiert.

Es ist aber bei der Robotersteuerung und auch generell in der Programmierung oft nötig, dass ein Programm auf Ereignisse reagiert. Der C++-Mechanismus dafür sind Anweisungen, die auf Bedingungen reagieren können.

4.6.1 if-Anweisung

<https://www.arduino.cc/reference/en/language/structure/control-structure/if/>

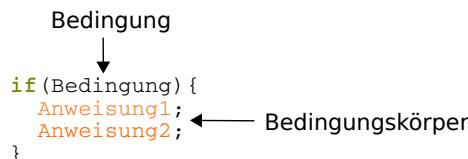


Abbildung 4.9: if-Anweisung

Die if-Anweisungen ist solch eine Anweisung. Sie erwartet eine Bedingung in runden Klammern und die auf die if-Anweisung folgende Anweisung im Bedingungskörper wird nur dann ausgeführt, wenn die Bedingung sich als "wahr" herausstellt.

```

if(12 > 5+3)
  Serial.println("zwoelf ist groesser als die Summe aus fuenf und drei");

```

In der Bedingung können unterschiedliche Vergleichsoperatoren verwendet werden. Die wichtigsten sind:

C++-Schreibweise	Vergleichsoperation
>	größer als
<	kleiner als
==	gleich
!=	ungleich

Die Bedingung kann auch Funktionsaufrufe enthalten. Im Falle der `farduino.input_get()`-Funktion ist das Ergebnis des Funktionsaufrufs bereits ein Wahrheitswert (wahr oder unwahr) und der Funktionsaufruf kann direkt verwendet werden. Soll mehr als eine Anweisung von der if-Anweisung betroffen sein, so kann man sie durch geschweifte Klammern ({ und }) zusammenfassen.

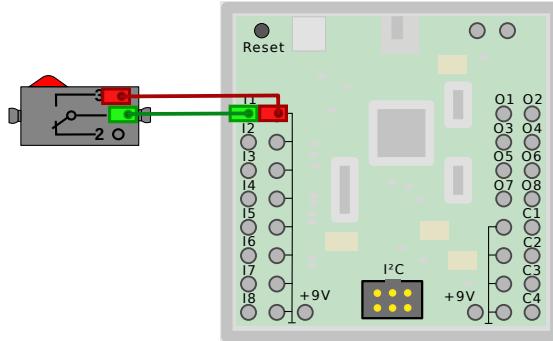


Abbildung 4.10: Taster an Eingang I1

```
#include <FtduinoSimple.h>

void setup() {
    // Vorbereiten der seriellen Verbindung
    Serial.begin(115200);
}

void loop() {
    // testen, ob die Taste an I1 gedrückt ist
    if(ftduino.input_get(Ftduino::I1)) {
        Serial.print("Der Taster ist gedrückt");
        // eine viertel Sekunde warten
        delay(250);
    }
}
```

4.7 Schleifen

Programmschleifen sind ebenfalls ein sehr fundamentales Konzept. Erst durch sie wird es möglich, Teile eines Programms mehrfach auszuführen. Ohne sie würden alle Anweisungen eines Programms einmal der Reihe nach abgearbeitet.

Allerdings gab es in den bisherigen Beispielen bereits das ein oder andere Programm, das etwas mehrfach getan hat. Das liegt an der Arduino-spezifischen `loop()`-Funktion. Sie wird automatisch während des Programmablaufs immer wieder aufgerufen wie in Abbildung 4.7 abgebildet. Dadurch lassen sich in Arduino-Sketches auch ohne den Einsatz von entsprechenden C++-Anweisungen Programmteile wiederholen.

Dennoch ist es hilfreich, auch auf die C+-eigenen Mechanismen für Schleifen zurückgreifen zu können. Im Folgenden werden zwei davon beschrieben.

4.7.1 while-Schleife

<https://www.arduino.cc/reference/en/language/structure/control-structure/while/>

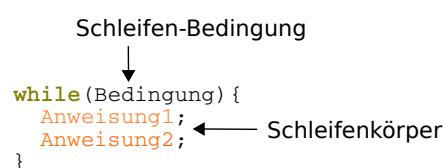


Abbildung 4.11: while-Schleife

Die `while`-Schleife erlaubt es, den folgenden Befehl im sogenannten Schleifenkörper solange zu wiederholen, wie die Bedingung zwischen ihren runden Klammern erfüllt ist. Wie schon bei der `if`-Anweisung können mehrere folgenden Anweisungen

durch geschweifte Klammern zusammengefasst werden. Die while-Schleife gilt dann für den gesamten Anweisungsblock. Ist die Bedingung von vornherein nicht erfüllt, so wird der Schleifenkörper nicht ausgeführt.

```
while(variableName < 12) {
    Serial.println("Variable ist kleiner 12");
    variablenName = variablenName + 1;
}
```

Die Bedingung gleicht ebenfalls der der if-Anweisung und kann die gleichen Operatoren enthalten. Das folgende Beispiel erweitert das Beispiel aus dem Abschnitt der if-Anweisung so, dass auf das Loslassen der Taste gewartet wird.

```
#include <FtduinoSimple.h>

void setup() {
    // Vorbereiten der seriellen Verbindung
    Serial.begin(115200);
}

void loop() {
    // testen, ob die Taste an I1 gedrückt ist
    if(ftduino.input_get(Ftduino::I1)) {
        Serial.print("Der Taster ist gedrückt");
        // eine viertel Sekunde warten
        delay(250);

        // warten, bis die Taste wieder losgelassen wird
        while(ftduino.input_get(Ftduino::I1)) {
            // der Raum zwischen den geschweiften Klammern kann
            // auch ganz leer bleiben, wenn während der
            // Wiederholung keine weiteren Anweisungen aus
            // geführt werden sollen
        }
    }
}
```

4.7.2 for-Schleife

<https://www.arduino.cc/reference/en/language/structure/control-structure/for/>

Etwas komplexer als die while-Schleife ist die for-Schleife. Sie enthält zwischen ihren Runden Klammern gleich drei durch Semikolon getrennte Anweisungen. Die erste wird vor Schleifenbeginn einmal ausgeführt, die zweite wird während der Ausführung der Schleife ausgewertet und bestimmt, wie die Bedingung der while-Schleife wie häufig die Schleife ausgeführt wird. Die dritte Anweisung wird schließlich *nach* jeder Ausführung des Schleifenkörpers ausgeführt. Ist die Bedingung von vornherein nicht erfüllt, so wird der Schleifenkörper nicht ausgeführt. Die Vor-Anweisung wird in jedem Fall ausgeführt.

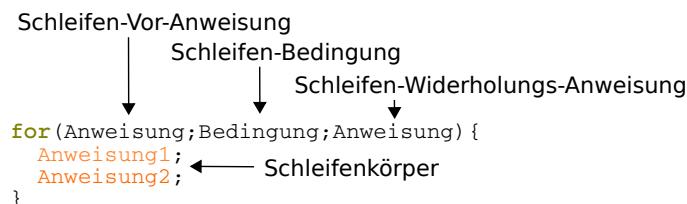


Abbildung 4.12: for-Schleife

Was recht aufwendig klingt wird verständlich, wenn man sich die übliche Anwendung der for-Schleife ansieht: Das Wiederholung eines Befehls mit einer bestimmten Häufigkeit.

```
for(variablenName = 0 ; variablenName < 12; variablenName = variablenName + 1)
    Serial.println("Dieser Text wird 12 mal ausgegeben");
```

Die drei Anweisungen bzw. Bedingungen innerhalb der runden Klammern lauten:

```
variablenName = 0;
variablenName < 12;
variablenName = variablenName + 1;
```

Die erste Anweisung wird nur einmal zu Beginn der Schleife ausgeführt. In diesem Fall schreibt sie den Wert 0 in die Variable variablenName die zweite Anweisung ist die Bedingung, die bestimmt wie oft die Schleife ausgeführt wird. In diesem Fall solange der Inhalt der Variable variablenName kleiner als 12 ist. Und die dritte Anweisung wird schließlich am Ende jedes Durchlaufs der `for`-Schleife ausgeführt. In diesem Fall wird dort der Inhalt der Variablen variablenName um eins erhöht. In diesem Beispiel passiert also:

1. Der Inhalt der Variablen variablenName wird auf 0 gesetzt
2. Solange der Inhalt der Variablen variablenName kleiner als 12 ist ...
 - (a) ... werden die Anweisungen im Schleifenkörper ausgeführt ...
 - (b) ... und danach der Inhalt der Variablen variablenName um eins erhöht

Der Schleifenkörper wird also genau 12 mal ausgeführt.

4.8 Beispiele

Die in diesem Kapitel vorgestellten C++-Sprachkonstrukte sowie die ausgewählten Funktionen der Arduino- und der [ftDuino](#)-Bibliotheken bilden zwar nur einen geringen Teil ab. Aber schon diese wenigen Informationen reichen, um einige interessante Sketches selbst zu schreiben.

4.8.1 Einfache Ampel

Dieses Beispiel stellt eine einfache Bedarfs-Ampel dar. Nach dem Einschalten zeigt sie zunächst rot. Sobald der Taster gedrückt wird springt sie für 10 Sekunde auf grün und wechselt dann zurück in den Anfangszustand.

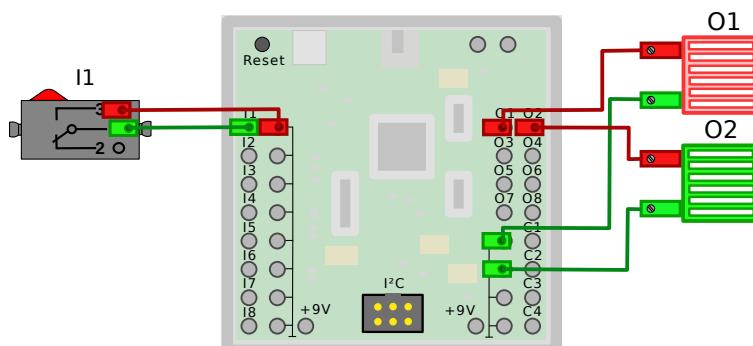


Abbildung 4.13: Einfache Ampel

Der dazugehörige Sketch ist sehr einfach. In der `setup()`-Funktion wird in Zeile 5 die rote Lampe eingeschaltet.

In der `loop()`-Funktion wird in Zeile 10 permanent getestet, ob der Taster gedrückt ist. Ist er gedrückt, so wird der gesamte Bedingungskörper in den Zeilen 11 bis 20 ausgeführt.

Dort wird in Zeile 12 die rote Lampe aus- und in Zeile 14 die grüne Lampe eingeschaltet. In Zeile 16 wird 10000 Millisekunden, also 10 Sekunden gewartet, bevor in den Zeilen 18 und 20 die grüne Lampe zunächst aus- und die rote dann eingeschaltet wird.

Dies ist ein Beispiel für Dinge, die aufgrund der Geschwindigkeit des Mikroprozessors als gleichzeitig wahrgenommen werden. Obwohl die Lampen in den Zeilen 12 und 14 bzw. 18 und 20 jeweils nacheinander ein- bzw. ausgeschaltet werden ist keine zeitliche Differenz erkennbar. Der Abstand von wenigen Mikrosekunden ist nicht erkennbar.

```

1 #include <FtduinoSimple.h>
2
3 void setup() {
4   // beim Start der Ampel leuchtet die rote Lampe
5   ftduino.output_set(Ftduino::O1, Ftduino::HI);
6 }
7

```

```

8 void loop() {
9     // testen, ob die Taste an I1 gedrückt ist
10    if(ftduino.input_get(Ftduino::I1)) {
11        // rote Lampe ausschalten
12        ftduino.output_set(Ftduino::01, Ftduino::OFF);
13        // grüne Lampe einschalten
14        ftduino.output_set(Ftduino::02, Ftduino::HI);
15        // zehn Sekunden warten
16        delay(10000);
17        // grüne Lampe ausschalten
18        ftduino.output_set(Ftduino::02, Ftduino::OFF);
19        // rote Lampe einschalten
20        ftduino.output_set(Ftduino::01, Ftduino::HI);
21    }
22 }

```

4.8.2 Schranke

Das Schrankenbeispiel ist etwas komplexer. Es besteht aus einer motorisierten Schranke mit jeweils zwei Endtastern. Der Taster an I2 wird betätigt, wenn sich die Schranke komplett geöffnet hat, der an I3 wird betätigt, wenn die Schranke vollständig geschlossen ist.

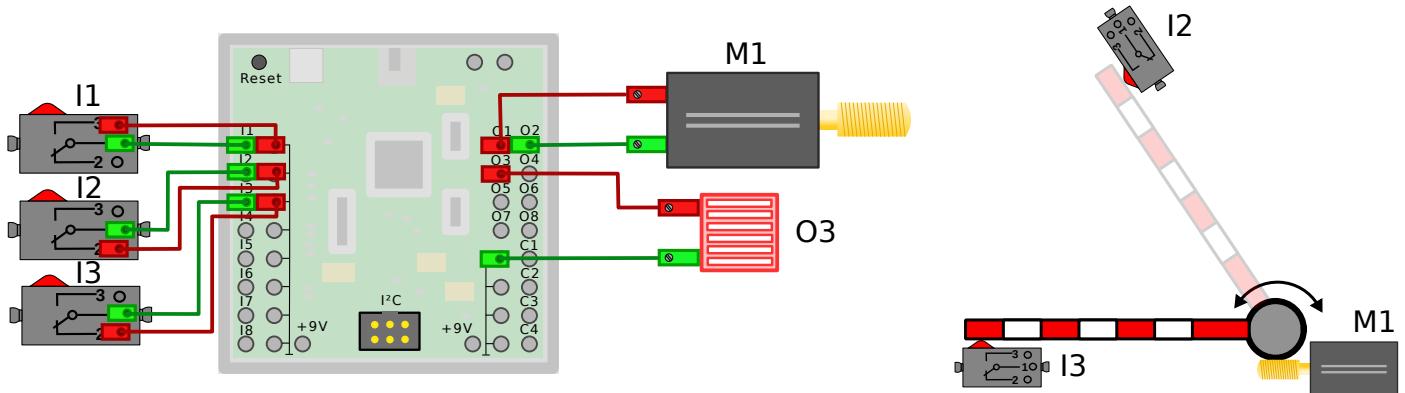


Abbildung 4.14: Schranke

Achtung: Taster I2 und I3 sind so verdrahtet, dass der Kontakt im unbetätigten Zustand geschlossen ist. Er öffnet sich, sobald die Taster betätigt werden, die Schranke also ganz geöffnet oder geschlossen ist.

Bei Sketchstart wird zunächst der Motor in Zeile 10 so lange linksherum gedreht, solange der Kontakt des Tasters an I2 in Zeile 15 als geschlossen erkannt wird, also solange die Schranke nicht vollständig geöffnet ist. Sobald der Taster betätigt wird wird der Motor in Zeile 18 gestoppt.

Sobald die Taste an I1 in Zeile 23 gedrückt wird wird der Motor in Zeile 26 diesmal rechtsherum gestartet bis der Taster an I3 betätigt wird. In Zeile 28 wird der Motor dann gestoppt.

In den Zeilen 31 bis 40 wird die Lampe an O3 insgesamt fünfmal mit einer Pause von jeweils 500 Millisekunden ein- und wieder ausgeschaltet.

Danach wird die Schranke schließlich in den Zeilen 43 bis 45 wieder geschlossen.

```

1 #include <FtduinoSimple.h>
2
3 // Zählervariable zum Blinken
4 int zahler;
5
6 void setup() {
7     // Beim Start fährt die Schranke auf
8
9     // motor linksherum drehen
10    ftduino.motor_set(Ftduino::M1, Ftduino::LEFT);
11
12    // Warten bis Schranke geschlossen offen ist. Da der Taster als

```

```

13 // Öffner verdrahtet ist läuft der Motor, solange der Taster
14 // geschlossen ist
15 while(ftduino.input_get(Ftduino::I2)) { }
16
17 // Sobald der Taster nicht mehr geschlossen ist Motor stoppen
18 ftduino.motor_set(Ftduino::M1, Ftduino::OFF);
19 }
20
21 void loop() {
22 // testen, ob die Taste an I1 gedrückt ist
23 if(ftduino.input_get(Ftduino::I1)) {
24
25 // Motor rechtsrum drehen, bis Taster I3 geöffnet ist
26 ftduino.motor_set(Ftduino::M1, Ftduino::RIGHT);
27 while(ftduino.input_get(Ftduino::I3)) { }
28 ftduino.motor_set(Ftduino::M1, Ftduino::OFF);
29
30 // fünfmal mit der Lampe blinken
31 for(zaehler=0;zaehler<5;zaehler=zaehler+1) {
32 // Lampe an
33 ftduino.output_set(Ftduino::O3, Ftduino::HI);
34 // 500ms warten
35 delay(500);
36 // Lampe aus
37 ftduino.output_set(Ftduino::O3, Ftduino::OFF);
38 // 500ms warten
39 delay(500);
40 }
41
42 // Motor linksherum drehen, bis Taster I2 geöffnet ist
43 ftduino.motor_set(Ftduino::M1, Ftduino::LEFT);
44 while(ftduino.input_get(Ftduino::I2)) { }
45 ftduino.motor_set(Ftduino::M1, Ftduino::OFF);
46 }
47 }

```

4.9 Die Warnung Wenig Arbeitsspeicher

Bei der Programmierung größerer Projekte und speziell bei der großzügigen Verwendung von Bibliotheken kann es leicht zu der in Abbildung 4.15 dargestellten Warnmeldung kommen.



Abbildung 4.15: Warnung der Arduino-IDE über geringen Arbeitsspeicher

Da der **ftDuino** lediglich über 2560 Bytes dynamischen Speicher (RAM-Speicher) verfügt ist der Umgang mit dieser knappen Ressource oft nicht einfach.

Die Warnung über den geringen Arbeitsspeicher bezieht ausschließlich auf den dynamischen RAM-Speicher und *nicht* auf den ebenfalls in der Meldung erwähnten Programmspeicherplatz (oft auch als Flash-Speicher bezeichnet). Der Programmspeicher kann bedenkenlos zu 100% gefüllt werden.

4.9.1 Auswirkungen

Im Flash-Speicher des **ftDuino** sind zu jeder Zeit zwei Programme gespeichert:

Bootloader Der Bootloader (siehe Abschnitt 1.2.1) ist in einem geschützten Teil des Flashspeichers abgelegt. Er wird genutzt, um Sketches aus der Arduino-IDE über USB in den übrigen Flash-Speicher zu laden.

Sketch Der Sketch wird vom Anwender mit Hilfe der Arduino-IDE und des Bootloaders installiert und kann sämtlichen Flash-Speicher nutzen, der nicht durch den Bootloader belegt wird. Im **ftDuino** stehen neben dem vom Bootloader belegten Bereich noch 28672 Bytes des Flash-Speichers für eigene Sketche zur Verfügung.

Für beide Programme hat die Meldung eine (unterschiedliche) Bedeutung.

Auswirkungen auf den Sketch

Die genauen Auswirkungen von RAM-Mangel auf den Sketch sind kaum vorhersagbar. Problematisch wird der Mangel an dynamischem Speicher dadurch, dass während der Sketchausführung immer mal wieder zusätzlicher dynamischer Speicher benötigt wird um beispielsweise Zwischenergebnisse von Rechnungen zu speichern oder zu speichern, wo die Sketchausführung nach dem Aufruf von Unterfunktionen fortgesetzt werden muss. Durch den Speichermangel werden dann Zwischenergebnisse oder Fortsetzungspunkte verfälscht. Die gesamte Programmausführung kann dann zu völlig unerwarteten und unsinnigen Reaktionen führen.

Ein solcher defekter Sketch kann jederzeit durch einen korrigierten Sketch ersetzt werden, um eine korrekte Programmausführung wieder herzustellen.

Im Zweifelsfall sollte man zunächst einen einfachen und bekannterenmaßen funktionsfähigen Sketch installieren. Der Blink-Sketch unter **Datei > Beispiele > 01. Basics > Blink** bietet sich dafür an.

Auswirkungen auf den Bootloader

Der Bootloader selbst ist ein eigenständiges Programm im Flash. Er ist von Engpässen beim dynamischen Speicher nicht betroffen, da er sich diesen Speicher nicht mit dem Sketch teilen muss. Allerdings gibt es einen kleinen zum Bootloader gehörigen Funktionsblock innerhalb eines jeden Sketches, der von der Arduino-IDE für den Anwender unsichtbar in den Code des Sketches integriert wird.

Dieser Teil realisiert die USB-Kommunikation mit dem PC während der Sketchausführung wird. Vor allem reagiert dieser Teil auf den von der Arduino-IDE gesendeten Befehl, den Bootloader in Vorbereitung eines Sketch-Uploads zu starten. Stellt dieser Teil des laufenden Sketches fest, dass die Arduino-IDE einen neuen Sketch übertragen will, so aktiviert sie den Bootloader. Der Bootloader wiederum handhabt in Folge den eigentlichen Empfang des neuen Sketches.

Bei dynamischem Speichermangel kann es passieren, dass dieser verborgene Teil des Sketches nicht korrekt funktioniert. Die Arduino-IDE kann dadurch selbst nicht mehr den Start des Bootloaders veranlassen und Upload-Versuche durch die Arduino-IDE scheitern. Unter Umständen ist die USB-Kommunikation zum PC so sehr beeinträchtigt, dass der **ftDuino** während der Sketch-Ausführung vom PC nicht korrekt oder ggf. sogar überhaupt nicht erkannt wird.

Für diesen Fall verfügt der **ftDuino** über einen Reset-Taster (siehe Abschnitt 1.2.3). Ist die Arduino-IDE durch Speichermangel im Sketch nicht mehr in der Lage, den **ftDuino** über USB anzusprechen und zur Aktivierung des Bootloaders zu veranlassen, so ist es mit dem Reset-Taster manuell immer noch möglich, den Bootloader im passenden manuell zu aktivieren wie in Abschnitt 1.3.2 beschrieben. Die Funktion des Reset-Tasters ist immer vorhanden und sie kann nicht durch einen fehlerhaften Sketch beeinflusst werden. Mit seiner Hilfe ist es immer möglich, einen neuen Sketch auf den **ftDuino** zu laden.

4.9.2 Vorbeugende Maßnahmen

Taucht die o.g. Warnung auf, so sollte man im Zweifelsfall davon Abstand nehmen, den Sketch auf den **ftDuino** zu laden. Auch wenn es mit Hilfe des Reset-Tasters immer möglich ist, den fehlerhaften Sketch zu ersetzen, so erfordert dieses Vorgehen ein gutes Timing und es kann einige Versuche erfordern, bis der störrische Sketch erfolgreich ersetzt ist.

Verwendung von Flash-Speicher für konstante Daten

In vielen Sketchen werden Textausgaben gemacht, entweder über den seriellen Monitor oder z.B. auf ein kleines Display. Üblicherweise enthält ein Sketch daher Zeilen wie die folgende.

```
Serial.println("Hallo Welt!");
```

Dabei ist nicht offensichtlich, dass hier 12 Bytes des kostbaren dynamischen RAM-Speichers unnötigerweise belegt werden. Das lässt sich leicht in einem minimalen Sketch testen:

```

1 void setup() {
2   Serial.begin(9600);
3 }
4 void loop() {
5   Serial.println("Hallo Welt!");
6   delay(1000);
7 }
```

Dieser Sketch belegt laut Arduino-IDE 163 Bytes bzw. 6% des dynamischen Speichers (der genaue Wert kann je nach Version der Arduino-IDE etwas schwanken). Kommentiert man Zeile 5 durch vorangestellte // aus, so reduziert sich der Speicherverbrauch auf 149 Bytes, es werden also ganze 14 Bytes des dynamischen Speichers gespart.

Der Grund liegt darin, dass die Arduino-IDE davon ausgeht, dass die Zeichenkette "Hallo Welt!" weiter verarbeitet werden soll. Daher legt die Arduino-IDE die Zeichenkette "Hallo Welt!" im dynamischen Speicher ab, wo sie vom Sketch verändert werden könnte. Da wir aber nicht vor haben, diese Zeichenkette jemals während der Sketch ausgeführt wird zu verändern könnte man sie auch im Flash-Speicher belassen. Genau dafür gibt es Hilfsfunktionen in der Arduino-IDE. Ein schlichtes F(...) um die Zeichenkette herum erledigt genau das. Dazu ersetzt man die bisherige "Hallo-Welt"-Ausgabe durch das folgende Konstrukt.

```
Serial.println(F("Hallo Welt!));
```

Dieser Sketch verhält sich identisch zur vorherigen Version, er belegt aber nur 151 statt 163 Bytes. Die Differenz entspricht genau der Länge der Zeichenkette "Hallo Welt!" zuzüglich eines weiteren Bytes, das die Zeichenkette beendet. In vielen Sketches lässt sich auf diese Weise bereits signifikant dynamischer Speicher sparen.

Der Umgang mit dem Flash-Speicher ist allerdings nicht ganz einfach. Das folgende Beispiel nutzt einen weiteren Hilfsmechanismus namens PROGMEM um eine Zeichenkette im Flash abzulegen. Leider lässt sich diese dann nicht einfach per println() ausgeben.

```

// das folgende klappt nicht, denn der ftDuino weiss nicht, ob er RAM
// oder Flash lesen soll
static const char str[] PROGMEM = "Hallo Welt!";
Serial.println(str);
```

Das Problem ist, dass println() nicht erkennen kann, ob str auf Flash- oder RAM-Speicher verweist. Eine mögliche Lösung ist, die Zeichen einzeln aus dem Flash-Speicher mit Hilfe spezieller Funktionen auszulesen und auszugeben wie im folgenden Beispiel:

```

static const char str[] PROGMEM = "Hallo Welt!\n";
for (char c = 0; c < strlen_P(str); c++)
  Serial.print((char)pgm_read_byte_near(str + c));
```

Die Dokumentation der Arduino-IDE hält viele weitere Beispiele zur Nutzung des Flash-Speichers bereit. Unter dem Stichwort PROGMEM finden sich weiterführende Informationen unter anderem unter

<https://www.arduino.cc/reference/en/language/variables/utilities/progmem/>

und

<http://playground.arduino.cc/Main/PROGMEM>.

Diese Technik lässt sich nicht nur auf Zeichenketten anwenden, sondern auf alle Arten statischer Daten wie Töne, Wertetabellen usw.

Verwendung von alternativen Bibliotheken

Bibliotheken sind eine praktische Sache, keine Frage. Und bei funktionsreichen Bibliotheken ist die Wahrscheinlichkeit umso höher, dass man alles findet, das man für sein konkretes Problem benötigt.

Oft sind es aber gerade die besonders umfangreichen Bibliotheken, die besonders ressourcenintensiv sind und eine große Menge Speicher belegen. Bei Verwendung des OLED-Displays aus Abschnitt 6.13.3 am ftDuino sind es zum Beispiel die Grafikbibliotheken von Adafruit, die alle Funktionen für aufwändige Grafiken mitbringen, aber gleichzeitig einen hohen Speicherverbrauch haben.

Mit wenigen Zeilen Code bringt das folgende Beispiel die Nachricht "Hallo Welt!" auf den OLED-Bildschirm.

```

1 #include <Adafruit_GFX.h>
2 #include <Adafruit_SSD1306.h>
3 Adafruit_SSD1306 display(-1);
4
5 void setup() {
6     display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
7     display.clearDisplay();
8     display.setTextColor(WHITE);
9     display.println("Hallo Welt!");
10    display.display();
11 }
12
13 void loop() { }
```

Schon dieses einfache Beispiel belegt 1504 Bytes bzw 58% des dynamischen Speichers. Das ist vor allem der Tatsache geschuldet, dass die Bibliothek für komplexe Zeichenoperationen eine Kopie des Bildschirminhalts im dynamischen Speicher vorhält. Bei 128 x 64 Pixel sind das bereits $128 \times 64 / 8 = 1024$ Bytes.

Ist man auf Grafikfähigkeiten aber gar nicht angewiesen, sondern kann mit einer Darstellung von 16 x 8 Zeichen auskommen, dann bieten sich sparsame Alternativen an.

Eine davon ist die U8g2-Bibliothek und dort speziell die mitgelieferte U8x8-Bibliothek. Sie lässt sich direkt im Bibliotheksmanger der Arduino-IDE installieren. Das "Hallo Welt!"-Beispiel sieht in diesem Fall wie folgt aus.

```

1 #include <U8x8lib.h>
2 U8X8_SSD1306_128X64_NONAME_HW_I2C u8x8(U8X8_PIN_NONE);
3
4 void setup(void)
5 {
6     u8x8.begin();
7     u8x8.setPowerSave(0);
8     u8x8.setFont(u8x8_font_chroma48medium8_r);
9     u8x8.drawString(0,0,"Hallo Welt!");
10 }
11
12 void loop() { }
```

Hier werden nur 578 Bytes entsprechend 22% des dynamischen Speichers belegt und es bleibt wesentlich mehr für andere Bibliotheken und eigenen Code übrig.

Bei vielen Bibliotheken ist es ähnlich und es kann sich lohnen, genau zu schauen, welche Ansprüche man hat und welche Bibliothek diese Ansprüche mit minimalem Aufwand und Ressourceneinsatz erfüllen kann. Oft lassen sich mit nur kleinen Einschränkungen bereits große Gewinne erzielen.

4.10 Weiterführende Informationen

Es gibt im Internet viele Tutorials sowohl zur C++-Programmierung² als auch zur Arduino-Programmierung³.

Diese und ähnliche Tutorials erklären viele weitere Sprachkonstrukte und Bibliotheksfunktionen. Solche Tutorials sind nicht auf den **fTDuino** zugeschnitten. Aber dieses Kapitel hat die nötigen Grundlagen geliefert, um auch mit anderen Tutorials weiterarbeiten zu können. Nicht alles aus der Welt der PC-Programmierung oder der Arduino-Programmierung lässt sich auf den **fTDuino** übertragen. Zusammen mit den Experimenten und Modellen der folgenden Kapitel sowie den fertig mitgelieferten Beispielprogrammen ist der tiefere Einstieg in die professionelle C++-Programmierung aber möglich.

²C++-Tutorial <http://www.online-tutorials.net/c-cpp-c/cpp-tutorial-teil-1/tutorials-t-1-58.html>

³Arduino-Tutorial <http://www.arduino-tutorial.de>

Kapitel 5

ftDuino in der Schule

Der ftDuino wurde wie alle Mitglieder der Arduino-Familie in erster Linie zur Programmierung in der Sprache C++ entworfen wie in Kapitel 4 beschrieben. Wird der ftDuino im Vorfeld mit einem entsprechende Sketch versehen, so kann er mit wesentlich geringerem Anspruch aber auch ohne Programmierwissen verwendet werden. Der ftDuino lässt sich so sehr flexibel in unterschiedlichen Klassenstufen einsetzen.



Abbildung 5.1: ftDuino-Programmierumgebungen mit unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad

In allen Fällen bedient sich der ftDuino dabei etablierten Projekten (Scratch, Blockly, ...). Dadurch bildet der ftDuino keine Insellösung sondern kann neben anderen z.B. Arduino-basierten Projekten gleichberechtigt eingesetzt werden. Wissen und Werkzeuge aus dem Arduino-Einsatz können auf den ftDuino übertragen werden und umgekehrt. Oft erlaubt der ftDuino so einen leichten Einstieg mit Hilfe eines fischertechnik-Modells und erst später folgt dann der elektrisch und mechanisch anspruchsvollere Aufbau auf Basis eines klassischen Arduinos.

5.1 Grafische Programmierung mit Scratch

Wikipedia schreibt zur Programmiersprache Scratch:

Zielsetzung

Ihr Ziel ist es, Neueinsteiger – besonders Kinder und Jugendliche – mit den Grundkonzepten der Programmierung vertraut zu machen. Unter dem Motto imagine, program, share („Ausdenken, Entwickeln, Teilen“) wird die kreative und explorative Erstellung eigener Spiele und Multimedia-Anwendungen, verbunden mit dem gegenseitigen Austausch darüber, als Motivation genutzt. Kostenlos und werbefrei können die Ergebnisse in einer internationalen Online-Community mit dem Scratch-Player abgespielt, diskutiert und weiterentwickelt werden. Außerdem gibt es einige Beispiele, die Anregungen für Einsteiger schaffen und das Prinzip des Programmierens näher bringen.

[https://de.wikipedia.org/wiki/Scratch_\(Programmiersprache\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Scratch_(Programmiersprache))

Scratch wurde im Original als reine Simulationsumgebung ausgelegt. Die Programmierung erfolgt grafisch mit der Maus am PC. Die Programmausführung sowie die Darstellung von Ergebnissen übernimmt ebenfalls der PC. Scratch sieht zunächst nicht vor, reale Hardware wie den **ftDuino** in die Programmentwicklung einzubinden.

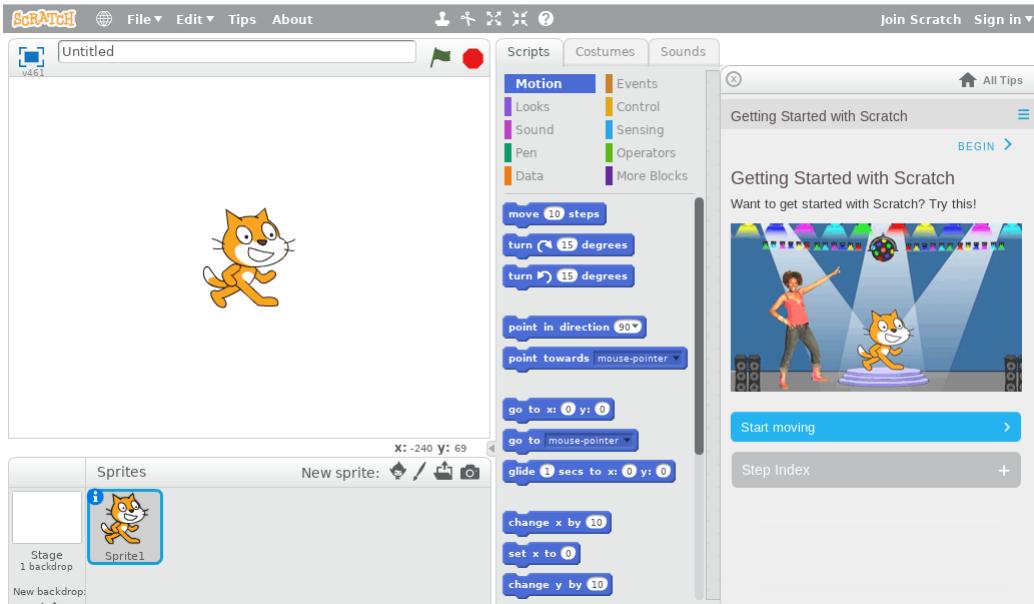


Abbildung 5.2: Die Scratch-2.0-Programmierumgebung

Scratch stammt aus dem englischsprachigen Umfeld und ist im Original unter <https://scratch.mit.edu/> zu finden. Es gibt aber auch deutschsprachige Portale wie das DACH-Scratch-Wiki unter <https://scratch-dach.info> und INF-Schule unter <https://www.inf-schule.de/programmierung/scratch>, die sich speziell an Lehrer und Schüler aus dem deutschen Sprachraum richten und einen Scratch-Einstieg in der Schule unterstützen.

5.1.1 Scratch-Versionen

Scratch ist inzwischen in drei unabhängigen Versionen erschienen.

Scratch 1.x wurde 2007 veröffentlicht und kam als eigenständiges PC-Programm. Auf der letzten Version 1.4 dieser Reihe basiert Scratch-for-Arduino (S4A), das sich auch mit dem **ftDuino** verwenden lässt wie in Abschnitt 5.1.2 beschrieben. Scratch 1 wird seit 2009 nicht mehr weiterentwickelt.

Scratch 2.0 erschien 2013 und war eine komplette Neuentwicklung. Scratch 2.0 ist Browser-basiert und nutzt das sogenannte Flash-Framework. Vor allem aus Sicherheitsgründen wird Flash in vielen modernen Browsers nicht mehr unterstützt. Die Nutzung von Scratch 2.0 gestaltet sich damit zunehmend schwieriger. Zur Nutzung externer Geräte wurde von Scratch 2.0 die Variante ScratchX (siehe <https://scratchx.org/>) abgeleitet. Eine **ftDuino**-Anbindung wurde für Scratch 2.0 bzw. ScratchX (bisher) nicht entwickelt.

Scratch 3.0 wurde 2019 veröffentlicht und ist wiederum eine komplette Neuentwicklung. Scratch 3.0 ist ebenfalls Browser-basiert, verzichtet aber auf Flash und verwendet stattdessen HTML5. Es ist daher in jedem modernen Browser nutzbar. Eine **ftDuino**-Anbindung ist in Abschnitt 5.1.3 beschrieben.

Für neue Projekte sollte Scratch 3.0 verwendet werden. Die Nutzung von Scratch for Arduino (S4A) ist nur dann sinnvoll, wenn auf eine bestehende S4A-Installation aufgebaut werden soll. S4A ist in vielen Schulen mit regulären Arduinos im Einsatz und kann ohne Änderungen direkt auch auf den **ftDuino** angewendet werden.

Scratch 3.0 ist dagegen in aktiver Entwicklung und auch die **ftDuino**-Anbindung wird aktiv weiterentwickelt.

5.1.2 Scratch 1.4 for Arduino (S4A)

Das Projekt **Scratch for Arduino**, kurz S4A baut auf Scratch 1.4 auf und hat sich zum Ziel gesetzt, eine Interaktion zwischen virtueller Scratch-Welt auf dem PC und physischer an den PC angeschlossener Hardware herzustellen. Das S4A-

Projekt greift dazu auf Arduinos zurück und integriert diese in die virtuelle Scratch-Umgebung. Das Scratch-Programm am PC kann dadurch auf Sensoreingaben (z.B. Tastendrücke) des angeschlossenen Arduino reagieren bzw. Aktionen an Aktoren (z.B. Lampen) am Arduino auslösen.

S4A ist mit den meisten gängigen Arduinos kompatibel. Diese müssen im Vorfeld mit einem entsprechenden Sketch versehen und per USB an den PC angeschlossen werden. Der entsprechende Sketch ist unter <http://s4a.cat/> erhältlich.

Im Gegensatz zu Scratch läuft S4A nicht im Browser sondern erfordert die Installation eines separaten Programms auf dem PC. Entsprechende Downloads finden sich unter <http://s4a.cat/>.

S4A stammt aus dem spanischsprachigen Raum und ist im Original unter <http://s4a.cat/> erhältlich. Deutschsprachige Informationen finden sich z.B. unter <https://scratch-dach.info/wiki/S4A>.

Scratch for *ftDuino*

Die Anpassung von S4A an den *ftDuino* betrifft nur den *ftDuino* selbst und den dort zu installierenden Sketch. PC-seitig besteht kein Unterschied zwischen S4A und dessen Verwendung mit dem *ftDuino*. Es können problemlos Arduinos und *ftDuino* gemeinsam genutzt werden.

Da Arduino und *ftDuino* unterschiedliche Anschlüsse haben muss der Benutzer wissen, unter welcher Bezeichnung die Anschlüsse des *ftDuino* unter S4A angesprochen werden können. Das folgende Bild zeigt die entsprechende Zuordnung.

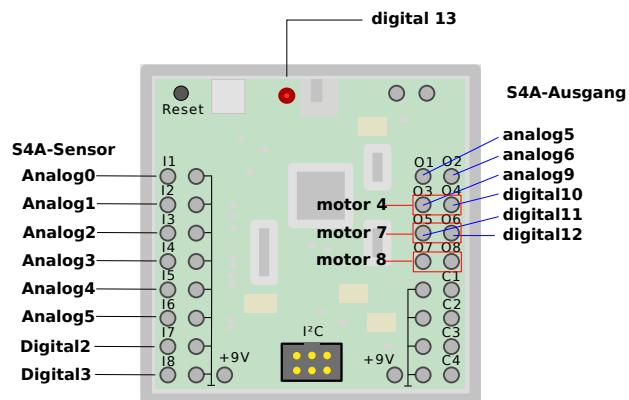


Abbildung 5.3: Zuordnung der *ftDuino*-Pins an S4A

Weiterführende Informationen zu Einsatz von S4A mit dem *ftDuino* finden sich in Abschnitt 8.6.

5.1.3 Scratch 3.0

Scratch 3.0 ist eine Online-Anwendung und kann direkt mit jedem gängigen Browser auf <https://scratch.mit.edu> geöffnet werden.

Scratch 3.0 lehnt sich trotz der kompletten Neuentwicklung und der völlig unterschiedlichen darunterliegenden Technologie sehr stark an Scratch 2.0 an und der Umstieg ist ggf. recht unproblematisch.

Die Verbreitung von Scratch in Schulen auch außerhalb des Einsatzes mit fischertechnik oder ähnlichen Systemen sorgt in der Regel für einen leichten und schnellen Start. Die Schüler können zunächst ohne zusätzliche Hardware direkt in der Scratch-Umgebung Erfahrungen sammeln und sich mit dem prinzipiellen Umgang vertraut machen. Der Einsatz des *ftDuino* kann dann fließend erfolgen und es ist kein Wechsel der Softwareumgebung nötig, wenn der Einsatz von realer Hardware in Scratch gewechselt werden soll.

Einsatz des *ftDuino* unter Scratch 3.0

Für den Einsatz des *ftDuino* sind zwei zusätzliche Dinge nötig. Zum einen muss auf dem *ftDuino* der passende Sketch installiert sein. Zum zweiten muss die verwendete Scratch-3.0-Variante eine passende sogenannte Extension beinhalten.

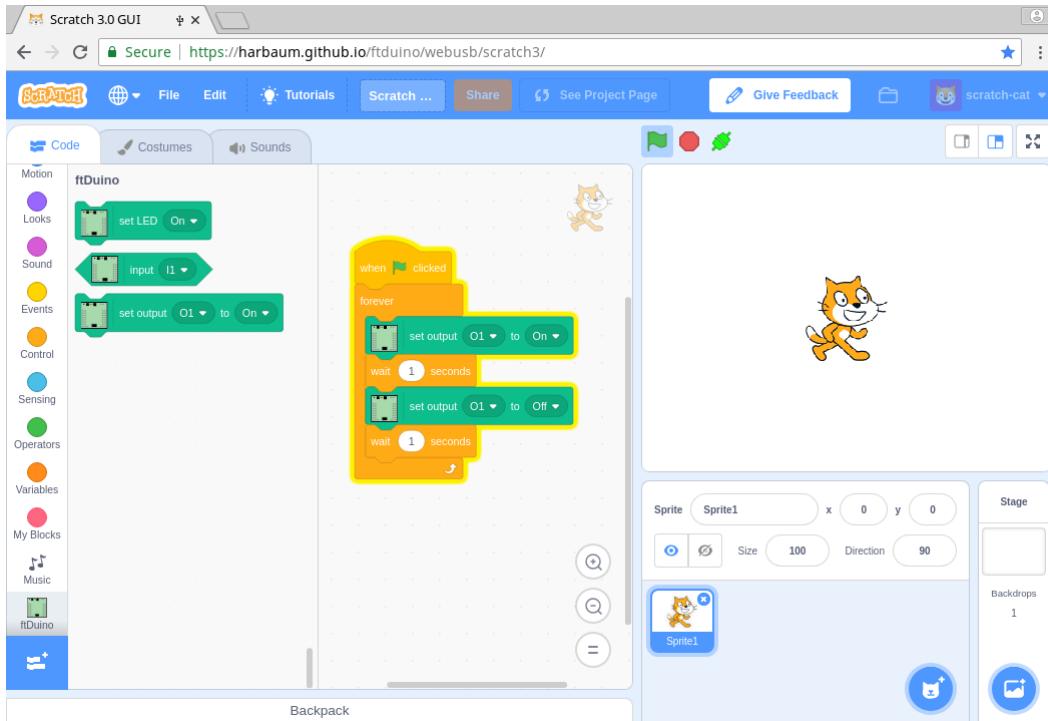


Abbildung 5.4: Der Hauptbildschirm vom Scratch3 mit ftDuino-Extension

Zur Nutzung von Scratch 3.0 sind folgende Schritte nötig:

- Installation des Datei > Beispiele > WebUSB > IoServer-Sketches auf dem ftDuino.
- Anschluss des ftDuino per USB an den PC oder das Smartphone
- Öffnen der Scratch-Webseite <https://harbaum.github.io/ftduino/webusb/scratch3/> im Chrome-Browser

Weitere Informationen zu WebUSB und zur Installation des passenden Sketches finden sich in Abschnitt 6.18.

Nach dem Start sind zunächst keine Extensions eingebunden. Die Extensions erreicht man über den Auswahlbildschirm.



Abbildung 5.5: Button zur Extension-Auswahl in Scratch 3.0

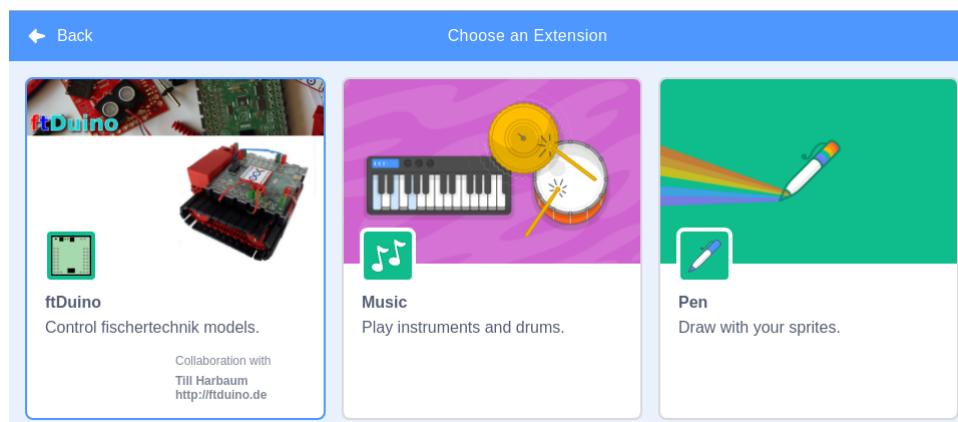


Abbildung 5.6: Die ftDuino-Extension im Auswahlbildschirm

Ein Klick auf die Extension installiert diese in Scratch. Der Zustand des angeschlossenen ftDuino wird durch ein drittes

Symbol neben der grünen Start-Flagge und dem roten Stop-Symbol angezeigt.

Das Symbol unterscheidet drei Zustände. Das rote Kreuz zeigt an, dass ein generelles Problem mit der USB-Anbindung vorliegt. Das orange "nicht verbunden"-Symbol zeigt an, dass ein *ftDuino* ausgewählt werden kann. Ein Klick dieses Symbols öffnet eine Liste der angeschlossenen Geräte, in diesem Fall dem *ftDuino*. Wird der *ftDuino* ausgewählt, so ändert sich das Symbol zu dem grünen Verbunden-Symbol und der *ftDuino* kann verwendet werden.



Abbildung 5.7: Das *ftDuino*-Status-Symbol neben den Start-Stop-Symbolen

Die Auswahl ist in der Regel nur einmal notwendig. Der *ftDuino* kann während der Benutzung an- und abgesteckt werden und sollte in der Folge automatisch eingebunden werden.

Offline-Nutzung von Scratch 3.0

Scratch 3.0 ist für die Benutzung im Browser und damit zunächst für die Online-Nutzung vorgesehen. Um Scratch 3.0 auch ohne Internet-Verbindung nutzen zu können ist es möglich, alle nötigen Daten lokal auf dem PC zu speichern.

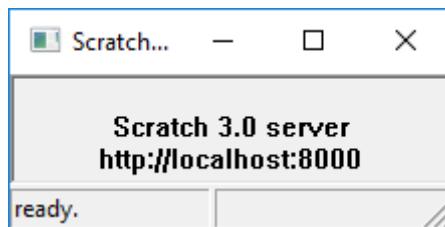


Abbildung 5.8: Der lokale Scratch-3.0-Server

Für diesen Zweck findet sich unter <https://github.com/harbaum/ftduino/releases> ein ZIP-Archiv namens `s30srv.zip`. Darin enthalten sind sämtliche Daten der Scratch-3.0-Installation, wie sie üblicherweise aus dem Internet bezogen werden. Zusätzlich ist eine kleine Windows-Anwendung namens `s30srv.exe` enthalten. Diese kann ohne Installation und ohne besondere Rechte gestartet werden und stellt die lokalen Daten einem Webbrower zur Verfügung. Das Programm benötigt keine weitere Aufmerksamkeit, muss aber solange Scratch verwendet werden soll offen gelassen werden.

Im Browser ist das Offline-Scratch dann unter <http://localhost:8000> zu erreichen.

Da sämtliche Daten lokal auf dem PC gespeichert sind finden natürlich keine automatischen Updates statt. Der Anwender muss also im Falle von Updates das ZIP-Archiv erneut herunterladen.

5.2 Grafische Programmierung mit Blockly/Brickly

Google hat sowohl das Potenzial der Scratch-Idee erkannt als auch die technischen Beschränkungen, denen es inzwischen unterworfen ist.

Blockly ist Googles Versuch, die Scratch-Philosophie auf eine moderne technische Basis zu heben. Blockly basiert auf HTML5 und ist damit auf absehbare Zeit in allen gängigen Webbrowsern und auf allen gängigen Plattformen (u.a. Windows, Apple MacOS, Linux, Android und IOS) lauffähig.

Scratch bildet eine komplette Umgebung und beinhaltet neben der grafischen Code-Darstellung auch gleich die Möglichkeit, die erstellten Programme auszuführen und deren Ergebnisse darzustellen. Blockly selbst ist dagegen ein reiner Code-Editor. Der mit Blockly erzeugte Code kann von Blockly selbst daher nicht ausgeführt werden und Blockly bringt auch keine

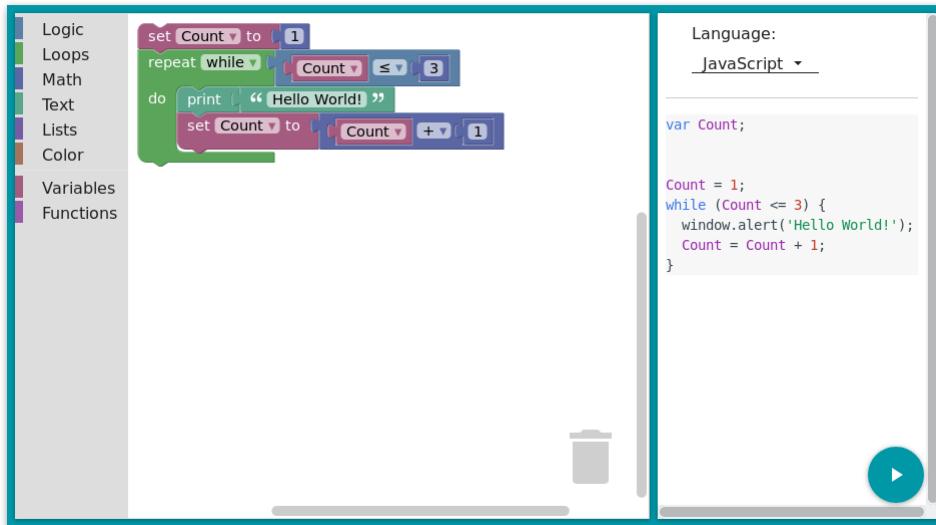


Abbildung 5.9: Die Blockly-Benutzeroberfläche

Mechanismen mit, um Programmausgaben darzustellen. Beides muss von einem Softwareentwickler erst hinzugefügt werden, um eine für den Endbenutzer verwendbare Umgebung zu schaffen.

Brickly (siehe Abschnitt 8.3) und Brickly-Lite (siehe Abschnitt 6.18.4) sind zwei auf Blockly basierende komplette Umgebungen, die speziell für den fischertechnik-TXT-Controller bzw. den [ftDuino](#) entwickelt wurden. Auch wenn beide Umgebungen bewusst ähnlich gehalten wurden und sich für den Anwender sehr ähnlich darstellen ist die technische Funktion sehr unterschiedlich.

5.2.1 Brickly

Im Falle von Brickly wird Blockly genutzt, um Code für den TXT-Controller zu entwickeln. Brickly ist erzeugt im Browser sogenannten Python-Code, der auf den TXT übertragen und dort ausgeführt wird. Einmal erstellte Brickly-Programme befinden sich dauerhaft auf dem TXT und können zu jedem späteren Zeitpunkt auch direkt am TXT manuell gestartet werden. Ein Web-Browser wird nur benötigt, um neue Programme zu erstellen. Während der Programmausführung auf dem TXT können Ausgaben auf dem Bildschirm des TXT erfolgen. Ist der Benutzer mit dem Web-Browser mit dem TXT verbunden, so werden diese Ausgaben vom TXT zusätzlich zurück an den Browser gesendet und dort ausgegeben.

Sämtliche im Browser dargestellten Informationen werden vom TXT an den Browser übertragen. Es werden keine Daten mit dem übrigen Internet ausgetauscht.

Brickly wurde primär dazu entwickelt, die Ein- und Ausgänge des TXT zu bedienen. Bricklys auf Blockly basierender grafischer Editor wurde daher um Blöcke erweitert, die sich zur Bedienung der Anschlüsse des TXT eignen. Durch zusätzliche Installation eines sogenannten Brickly-Plugins auf dem TXT (siehe <https://github.com/harbaum/brickly-plugins>) kann Brickly erweitert werden. Ein solches Plugin erlaubt es, einen [ftDuino](#) per USB mit dem TXT zu koppeln und aus dem Brickly-Programm heraus neben dem TXT selbst auch die Anschlüsse des angeschlossenen [ftDuino](#) zu bedienen.

Brickly ist auch von jungen Schülern leicht zu bedienen und verfügt gegenüber Scratch über eine einfachere und leichter zu nutzenden Benutzeroberfläche. Die Nutzung von Brickly erfordert aber zuvor die Installation der Brickly-Software auf dem TXT, was wiederum die Nutzung der sogenannten Community-Firmware auf dem TXT voraussetzt (siehe <https://cfw.ftcommunity.de/ftcommunity-TXT/de/>). Für die Nutzung des [ftDuino](#) am TXT ist zusätzlich die Installation des [ftDuino](#)-Plugins nötig. Sehr erfahrene Nutzer können statt des TXT-Controllers auch den wesentlich günstigeren Raspberry-Pi nutzen. Für den Endanwender ergibt sich kein Unterschied, auch dieses Setup ist von Schülern leicht zu bedienen.

Zur späteren Nutzung von Brickly sind folgende vorbereitende Schritte nötig:

- Installation des Community-Firmware auf dem TXT (alternativ auf dem Raspberry-Pi, siehe <https://github.com/harbaum/tx-pi>)

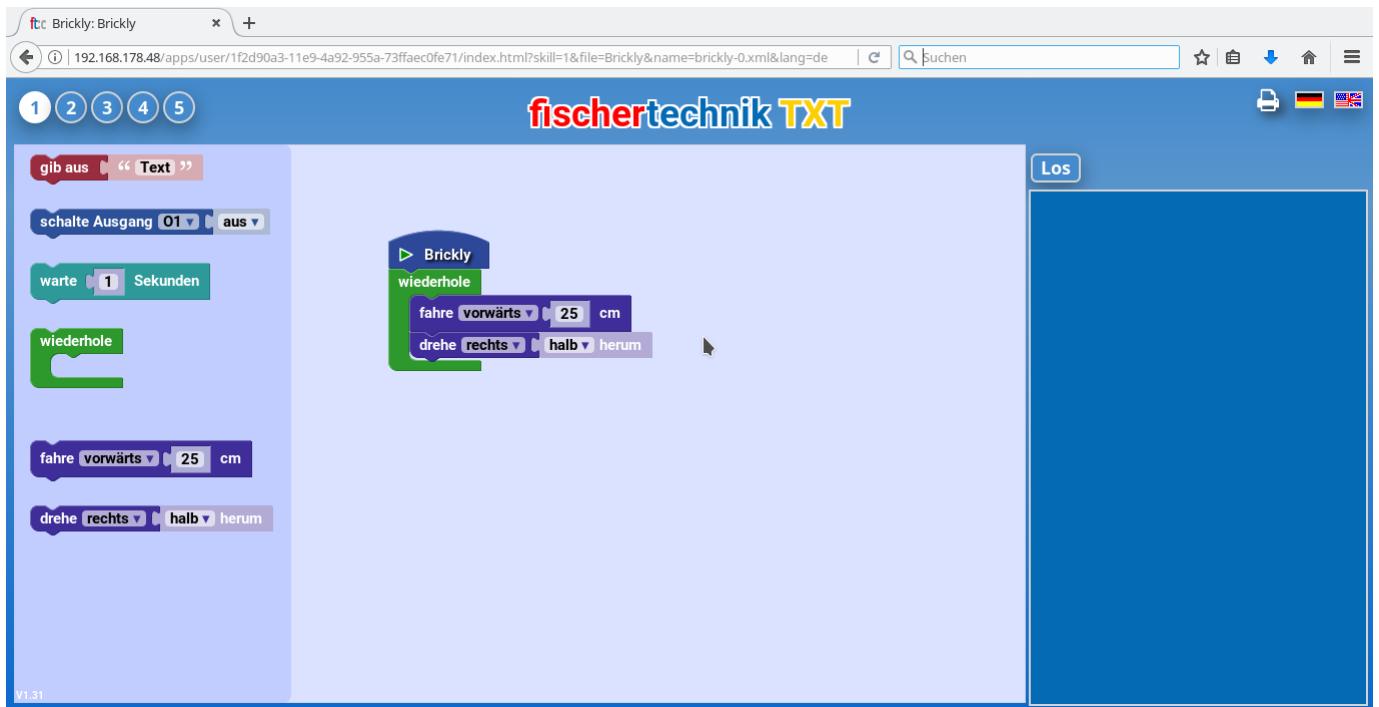


Abbildung 5.10: Die Brickly-Benutzeroberfläche

- Installation von Brickly auf dem TXT (siehe <https://cfw.ftcommunity.de/ftcommunity-TXT/de/programming/brickly/>)
- Zugriff auf den TXT per beliebigem Browser

Soll zusätzlich der ftDuino von TXT aus angesprochen werden sind weiterhin folgende Schritte nötig:

- Installation des `ftduino_direct`-Sketches auf dem ftDuino (siehe https://github.com/PeterDhabermehl/ftduino_direct)
- Installation des `ftduino-Brickly`-Plugins (siehe <https://github.com/harbaum/brickly-plugins>)

5.2.2 Brickly-Lite

Wesentlich geringer als bei Brickly ist der administrative Aufwand bei der Nutzung von Brickly-Lite. Aus Schülersicht ist der Unterschied zwischen Brickly und Brickly-Lite minimal. Brickly-Lite bietet eine nochmal vereinfachte Darstellung.



Abbildung 5.11: Die Brickly-Lite-Benutzeroberfläche

Im Gegensatz zu Brickly bezieht Brickly-Lite alle Daten aus dem Internet. Für die Benutzung von Brickly-Lite ist daher eine Internet-Verbindung Voraussetzung. Und während bei Brickly der Browser lediglich zur Code-Eingabe und zur Ergebnisausgabe verwendet wird übernimmt er bei Brickly-Lite fast alle Aufgaben inklusive der eigentlichen Programmausführung. Der **ftDuino** stellt daher bei Brickly-Lite dem Browser seine Ein- und Ausgänge zur Verfügung, führt aber das eigentliche Brickly-Programm nicht aus. Aus diesem Grund ist zur späteren Programmausführung der Browser immer nötig. Ein mit Brickly-Lite erstelltes Programm kann ohne Browser nicht ausgeführt werden.

Der Schüler merkt von diesen Unterschieden nichts. Für den Lehrer ist aber der Vorbereitungsaufwand gegenüber Brickly sehr viel geringer, da neben **ftDuino** und Browser keine weiteren Komponenten benötigt werden. Größte Einschränkung ist die Festlegung auf den Chrome-Browser (siehe https://www.google.com/intl/de_ALL/chrome/). Dieser wird benötigt, da nur dieser Browser-Typ mit lokal per USB abgeschlossenen Geräten wie in diesem Fall dem **ftDuino** kommunizieren kann.

Zur Nutzung von Brickly-Lite sind folgende Schritte nötig:

- Installation des `Datei > Beispiele > WebUSB > IoServer`-Sketches auf dem **ftDuino**.
- Anschluss des **ftDuino** per USB an den PC oder das Smartphone
- Öffnen der Brickly-Lite-Webseite <https://harbaum.github.io/ftduino/webusb/brickly-lite/> im Chrome-Browser

5.3 Spielerische Programmierung in Minecraft

Minecraft ist ein extrem populäres Aufbauspiel. Es beinhaltet unter anderem eine Art elektrischer Schaltungssimulation in Form des sogenannten Redstone. Mit diesem leitfähigen virtuellen Material lassen sich entsprechende Blöcke im Spiel verbinden und es lassen sich Spiel-interne Sensoren wie Taster und Schalter mit Aktoren wie Lampen und Druckzylindern verbinden. Zusätzliche Logikelemente wie die Redstone-Fackel (Inverter, Negierer), ein Vergleicher oder ein Verzögerungs-element erlauben komplexe Schaltungen.

Mit dem **ftDuino** lässt sich Minecraft mit der physischen Welt verbinden und virtuelle Sensoren in Minecraft können physische fischertechnik-Aktoren auslösen und umgekehrt.



Abbildung 5.12: Minecraft mit **ftDuino**-Schnittstelle

Die Vorbereitungszeit auf Lehrerseite beschränkt sich auf das Ausspielen des passenden Sketches auf den **ftDuino** sowie die Installation der entsprechenden **ftDuino**-Mod in eine bestehende Minecraft-Installation wie in Abschnitt 8.7 beschrieben. Minecraft ist eine kommerzielle Software und benötigt eine separat zu erwerbende Lizenz. Die Modifikation des Spiels durch Erweiterungen wie der **ftDuino**-Mod wurde vom Hersteller explizit vorgesehen und verletzt keine Lizenzbedingungen.

Auf Schülerseite ist die Einarbeitung theoretisch recht aufwändig. In der Praxis ist ein großer Teil der Schüler mit den Konzepten von Minecraft bis ins kleinste Detail vertraut und versteht die Logik der zusätzlichen *ftDuino*-Blöcke sofort. In der Regel sind Minecraft-erfahrene Schüler in wenigen Minuten in der Lage einfache Schaltungen wie Lauflichter zu realisieren und mit dem physischen Modell zu verbinden.

Der Einsatz von Minecraft eignet sich vor allem zur Motivation bereits Minecraft-affiner Schüler. Als Lehrer hat man hier besonders mit Schülern zu rechnen, die ein extrem großes Fachwissen und erstaunliche Fähigkeiten mitbringen. Minecraft lädt geradezu dazu ein, unorthodoxe Lösungen zu erstellen und z.B. virtuelle Lebewesen oder Fahrzeuge (Loren) in die Signbalverarbeitung einzubinden.

Zur Nutzung von Minecraft sind folgende im Abschnitt 8.7 im Detail beschriebenen Schritte nötig:

- Installation einer lizenzierten Minecraft-Version 1.12.2
- Installation des Forge-Mod-Systems
- Installation der *ftDuino*-Mod
- Installation des `Datei > Beispiele > WebUSB > IoServer` -Sketches auf dem *ftDuino*.
- Anschluss des *ftDuino* per USB an den PC

5.4 Textbasierte Programmierung mit der Arduino-IDE

Scratch und Brickly sind selbst komplexe Konstrukte. Sie werden als Programm auf dem PC oder als aktive Webseite im Browser z.B. eines Mobilgeräts ausgeführt. Der *ftDuino* fungiert in beiden Fällen nur als relativ passiver Schnittstellenbaustein. Er nimmt Befehle über seinen USB-Anschluss vom PC entgegen und sendet Ergebnisse zurück.

Für den Anwender bleibt damit – wie bei der Benutzung von PCs üblich – der größte Teil der Technik in den Programmen verborgen. Während sich so die Grundlagen der Programmierung verstehen lassen ist es einem Anfänger kaum möglich, alle zugrundeliegenden Komponenten und Verfahren zu verstehen.

5.4.1 Die Arduino-Idee

Das ursprüngliche Konzept der Arduinos zielt darauf ab, ein fundamentales Verständnis zu vermitteln. Der Arduino und der davon abgeleitete *ftDuino* gehören zu den technisch einfachsten programmierbaren Geräten. Die Technik auf der sie basieren entspricht derjenigen, die auch in vielen alltäglichen Geräten wie Computermäusen, Kaffeemaschinen oder Getränkeautomaten nahezu unsichtbar und unbemerkt eingesetzt wird.

Die Zahl und Komplexität der auf einem Arduino verwendeten Bauteile ist so gering wie möglich gehalten, so dass das gesamte Gerät auch von interessierten Laien weitgehend durchschaut werden kann. Trotzdem liegen die für diese Art der Verwendung nötigen Fähigkeiten deutlich über denen zur Benutzung von Scratch oder Brickly. Der direkte Umgang mit dem Arduino erfordert größeres Know-How bei Schüler und Lehrer und ist ungefähr ab Klasse 7 bis 8 sinnvoll möglich.

Arduino in der Schule

Arduinos werden bereits in breitem Maße in der Schule eingesetzt. Speziell der geringe Preis und die Verbreitung in Privathaushalten führt zu einer geringen Einstiegshürde.

Allerdings ist die Lernkurve relativ steil und das erforderliche Know-How steigt mit der Komplexität der Aufgabenstellungen schnell an. Arduinos werden als unverkleidete Platinen vertrieben und ihre Elektronik und Anschlüsse sind gegen äußere Einflüsse weitgehend ungeschützt. Vor allem der geringe Preis relativiert diese Nachteile, da sich versehentlich zerstörte Teile mit geringen Kosten ersetzen lassen. Die einfachsten Arduinos sind für unter drei Euro erhältlich, weitere Kosten fallen zunächst nicht an.

Die Programmierumgebung Arduino-IDE ist als kostenloser Download unter <https://www.arduino.cc/en/Main/Software> für alle gängigen PC-Betriebssysteme verfügbar. Viele Dokumentationen und Beispiele sind im Internet frei verfügbar. Arduino-Soft- und Hardware ist unter gängigen Open-Source-Lizenzen verfügbar und darf lizenzfrei geteilt werden. Der Einsatz in der Schule ist damit bedenkenlos möglich und der freie Austausch der meisten Unterlagen unterliegt keinen im Schul-Umfeld relevanten Beschränkungen.

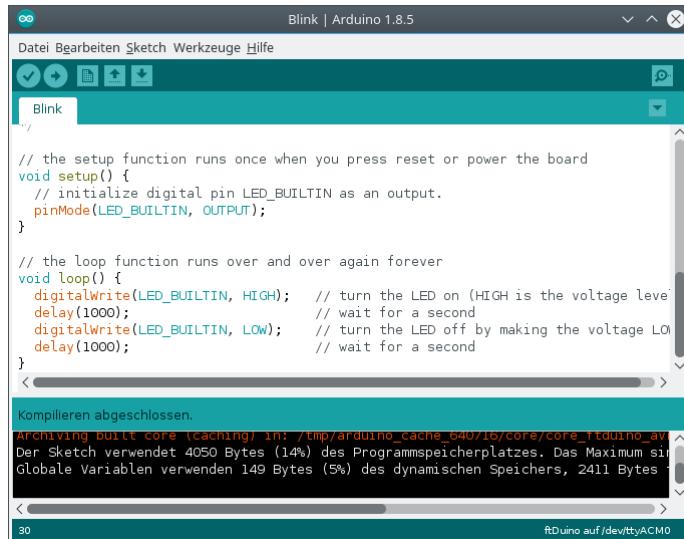


Abbildung 5.13: Die Arduino-IDE

5.4.2 Arduino und ftDuino

Der **ftDuino** ist eine Erweiterung des Arduino-Konzepts in Richtung fischertechnik. Der **ftDuino** wird programmiert wie ein Arduino, nutzt aber elektrische und mechanische fischertechnik-Komponenten, um den Aufbau komplexer Modelle zu ermöglichen.

Dabei bietet der **ftDuino** gegenüber einem Arduino einige Vereinfachungen, die die Einstiegshürde senkt. Der **ftDuino** ist aus Anwendersicht nicht zwangsläufig als Fortführung des Arduino-Gedankens zu verstehen. Er eröffnet vielmehr einen einfacheren Einstieg in die Arduino-Welt.

Der **ftDuino** lehnt sich nah an den Arduino Leonardo an. Er erweitert den Leonardo um folgende Eigenschaften:

Robustheit Der **ftDuino** ist robust. Seine Anschlüsse sind entgegen denen des Arduino kurzschlussfest und die Elektronik wird durch ein geschlossenes Gehäuse geschützt.

Versorgungsspannung Der **ftDuino** wird mit fischertechnik-üblichen 9 Volt betrieben und kann diese Spannungen auch an allen Ein- und Ausgängen nutzen während der Arduino für maximal 5 Volt ausgelegt ist und mit vielen fischertechnik-Elementen nicht direkt verbunden werden darf.

Eingänge Der **ftDuino** verfügt über 8 dedizierte Analogeingänge I1 bis I8 und 4 Zählereingänge C1 bis C4, die bereits für die Spannungs-, Widerstands- bzw. Ereignismessung vorbereitet sind. Der Arduino verfügt dagegen über universell verwendbare Ein- und Ausgänge, die jedoch durch entsprechende zusätzliche Beschaltung an die konkrete Verwendung angepasst werden können.

Ausgänge Der **ftDuino** verfügt über 8 dedizierte Analogausgänge O1 bis O8, die leistungsstark genug zur Ansteuerung von Lampen und Motoren sind. Die universellen Ein- und Ausgänge benötigen zusätzliche Beschaltung, um leistungsstarke Verbraucher ansteuern zu können.

5.4.3 Der **ftDuino** als Einstiegs-Arduino

Der **ftDuino** erlaubt den einfachen und unproblematischen Einstieg in den Arduino-Einsatz in der Schule. Er ist robust genug für den Schulalltag und erfordert zusammen mit dem fischertechnik-System keine weiteren elektrischen, elektronischen oder mechanischen Voraussetzungen. Alle mechanischen und elektrischen Verbindungen werden gesteckt und es wird kein Werkzeug benötigt. Viele direkt mitgelieferte Beispiele u.a. in dieser Anleitung erlauben einen einfachen und sicheren Start.

Der **ftDuino** kann dabei den Einsatz des klassischen Arduino vorbereiten. Der Aufbau eines Prototypen aus **ftDuino** und Arduino bietet einen sicheren Start. Eine spätere Umsetzung mit klassischen Arduinos, zusätzlicher Elektronik und speziell aufgebauter Mechanik erfolgt dann auf Basis der mit dem **ftDuino** gewonnenen Erkenntnissen.

Kapitel 6

Experimente

Die Experimente dieses Kapitels konzentrieren sich auf einzelne Aspekte des **ftDuino**. Sie veranschaulichen einen Effekt oder ein Konzept und verwenden dafür nur minimale externe Komponenten. Die Experimente stellen an sich keine vollständigen Modelle dar, können aber oft als Basis dafür dienen.

Beispiele für komplexe Modelle finden sich im Kapitel 7.

6.1 Lampen-Zeitschaltung

Schwierigkeitsgrad: ★★★★★

Dieses sehr einfache Modell besteht nur aus einem Taster und einer Lampe und bildet die Funktion einer typischen Treppenhausbeleuchtung nach. Um Energie zu sparen wird hier nicht einfach ein Kippschalter genommen, um das Licht zu schalten. Stattdessen wird ein Taster verwendet und jeder Druck auf den Taster schaltet das Licht nur für z.B. zehn Sekunden ein. Wird während dieser Zeit der Taster erneut gedrückt, so verlängert sich die verbleibende Zeit wieder auf volle zehn Sekunden. Nach Ablauf der zehn Sekunden verlischt das Licht und das Spiel beginnt von vorn.

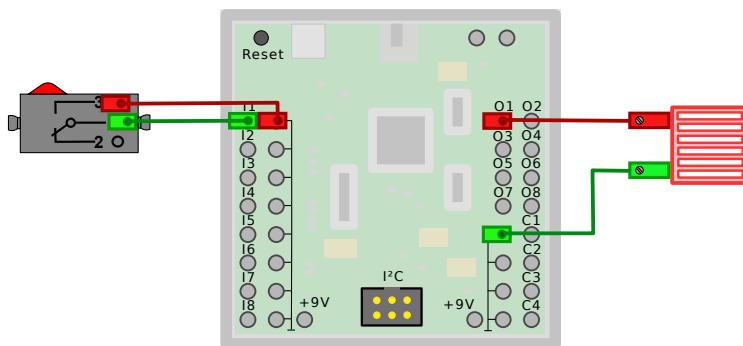


Abbildung 6.1: Lampen-Zeitschaltung

6.1.1 Sketch LampTimer

Der folgende Sketch findet sich bei installierter **ftDuino**-Unterstützung im Menü der Arduino-IDE unter **Datei > Beispiele > FtduinoSimple > LampTimer**.

```
1  /*
2   LampTimer - Lampen-Zeitschaltuhr
3
4   (c) 2017 by Till Harbaum <till@harbaum.org>
5
```

```

6     Schaltet eine Lampe an Ausgang 01 für 10 Sekunden ein,
7     sobald ein Taster an Eingang I1 gedrückt wird.
8 */
9
10 #include <FtduinoSimple.h>
11
12 uint32_t startzeit = 0;
13
14 // Die Setup-Funktion wird einmal ausgeführt, wenn Reset gedrückt oder
15 // das Board gestartet wird.
16 void setup() { }
17
18 // Die Loop-Funktion wird endlos immer und immer wieder ausgeführt
19 void loop() {
20     // Teste, ob der Taster an I1 gedrückt ist
21     if(ftduino.input_get(Ftduino::I1)) {
22         // merke Startzeit
23         startzeit = millis();
24
25         // schalte Lampe ein (Ausgang HI)
26         ftduino.output_set(Ftduino::O1, Ftduino::HI);
27     }
28
29     // gültige Startzeit und seitdem mehr als 10 Sekunden
30     // (10.000 Millisekunden) verstrichen?
31     if((startzeit != 0) &&
32         (millis() > startzeit + 10000)) {
33         // vergiss Startzeit
34         startzeit = 0;
35         // schalte Lampe aus (Ausgang OFF)
36         ftduino.output_set(Ftduino::O1, Ftduino::OFF);
37     }
38 }
```

Sketchbeschreibung

Die für die Lampen-Zeitschaltung nötigen Funktionen des `ftDuino` sind sehr einfach und die Anwendung lässt sich mit der einfachen `FtduinoSimple`-Bibliothek (siehe Abschnitt 9.1) abdecken.

Der Arduino-Sketch enthält eine leere `setup()`-Funktion, da keine Initialisierung nötig ist. Sämtliche Funktionalität steckt in der `loop()`-Funktion.

Die Taste an I1 wird über `input_get()` permanent abgefragt. Ist sie gedrückt, so wird die aktuelle Zeit seit Gerätestart in Millisekunden mit der Funktion `millis()` abgefragt und in der Variablen `startzeit` gespeichert und die Lampe wird eingeschaltet. War die Lampe bereits an, dann bewirkt dieses zusätzliche Einschalten nichts, aber der bereits gesetzte Zeitwert in `startzeit` wird durch den aktuellen ersetzt.

Unabhängig davon wird permanent getestet, ob `startzeit` einen gültigen Wert enthält und ob die aktuelle Systemzeit bereits mehr als zehn Sekunden (10.000 Millisekunden) nach dem dort gespeicherten Wert liegt. Ist das der Fall, dann sind seit dem letzten Tastendruck mehr als zehn Sekunden vergangen und die Lampe wird ausgeschaltet sowie der Wert in `startzeit` auf Null gesetzt, um ihn als ungültig zu markieren.

Aufgabe 1: 20 Sekunden

Sorge dafür, dass die Lampe nach jedem Tastendruck 20 Sekunden lang an bleibt.

Lösung 1:

In Zeile 32 muss der Wert 10000 durch den Wert 20000 ersetzt werden, damit die Lampe 20000 Millisekunden, also 20 Sekunden eingeschaltet bleibt.

```

31     if((startzeit != 0) &&
32         (millis() > startzeit + 20000)) {
```

Aufgabe 2: Keine Verlängerung

Sorge dafür, dass ein weiterer Druck auf den Taster, während die Lampe bereits leuchtet, die verbleibende Zeit nicht wieder auf 10 Sekunden verlängert.

Lösung 2:

Vor der Zuweisung in Zeile 23 muss eine zusätzliche Abfrage eingefügt werden, die nur dann einen neuen Wert setzt, wenn bisher keiner gesetzt war. Beide Zeilen zusammen sehen dann so aus:

```
23     if (startzeit == 0)
24         startzeit = millis();
```

Expertenaufgabe:

Schließt Du statt der Lampe eine Leuchtdiode an (der rote Anschluss der Leuchtdiode muss an Ausgang 01), dann wirst Du etwas merkwürdiges bemerken, wenn das Licht eigentlich aus sein sollte: Die Leuchtdiode leuchtet trotzdem ganz schwach, obwohl der Ausgang doch OFF ist. Wie kommt das?

Erklärung

Durch eine Lampe oder Leuchtdiode fließt ein Strom, wenn zwischen den beiden An schlüssen ein Spannungsunterschied besteht. Den einen Anschluss haben wir fest mit Masse bzw. 0 Volt verbunden, der andere ist offen und wird von den Bauteilen im ftDuino nicht mit Spannung versorgt. Anders als bei einem mechanischen Schalter ist diese Trennung bei dem im ftDuino als sogenannter Ausgangstreiber verwendeten Halbleiterbaustein aber nicht perfekt. Ein ganz kleiner sogenannter Leckstrom fließt trotzdem zur 9V-Versorgungsspannung. Dieser kleine Strom reicht nicht, die Lampe zum Leuchten zu bringen. Aber er reicht, die wesentlich effizientere Leuchtdiode ganz leicht aufzuleuchten zu lassen.

Lässt sich daran etwas ändern? Ja! Statt den Ausgang komplett unbeschaltet zu lassen können wir dem Ausgangstreiber im ftDuino sagen, dass er den Ausgang fest auf Masse (0 Volt) schalten soll. Beide Anschlüsse der Leuchtdiode liegen dann fest auf Masse und die Einflüsse irgendwelcher Leckströme treten nicht mehr in Erscheinung. Dazu muss in der Zeile 36 die Konstante OFF durch LO ersetzt werden. LO steht für low, englisch niedrig und meint in diesem Fall 0 Volt. Die Leuchtdiode erlischt nun komplett nach Ablauf der Zeit.

```
36     ftduino.output_set(Ftduino::01, Ftduino::LO);
```

Direkt nach dem Einschalten des ftDuino leuchtet die Leuchtdiode aber nach wie vor. Vielleicht findest Du selbst heraus, wie sich das ändern lässt. Tipp: Die bisher unbenutzte setup()-Funktion könnte helfen.

Mehr dazu gibt es im Abschnitt 6.8.

6.2 Not-Aus

Schwierigkeitsgrad: ★★★★★

Ein Not-Aus-Schalter kann Leben retten und scheint eine einfache Sache zu sein: Man drückt einen Taster und die betreffende Maschine schaltet sich sofort ab. Im Modell stellt ein XS-Motor mit Ventilator an Ausgang M1 die Maschine dar. Ein Taster an Eingang I1 bildet den Not-Aus-Taster.

6.2.1 Sketch EmergencyStop

```
1  /*
2   EmergencyStop - Not-Aus
3
4   (c) 2017 by Till Harbaum <till@harbaum.org>
5
6   Schaltet einen Ventilator aus, sobald der Not-Aus-Taster
```

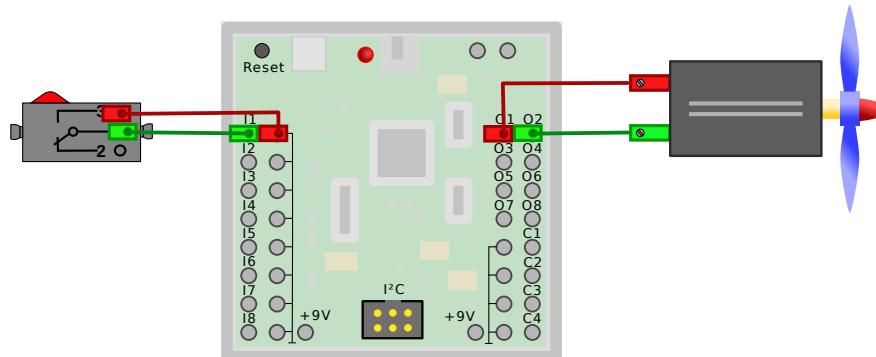


Abbildung 6.2: Not-Aus

```

7     betätigt wird.
8 */
9
10 #include <FtduinoSimple.h>
11
12 // Die Setup -Funktion wird einmal bei Start des Systems ausgeführt
13 void setup() {
14     // Ventilator bei Start des Systems einschalten
15     ftduino.motor_set(Ftduino::M1, Ftduino::LEFT);
16
17     // Ausgang der internen roten LED aktivieren
18     pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
19     // und LED ausschalten
20     digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
21 }
22
23 // Die Loop -Funktion wird endlos immer und immer wieder ausgeführt
24 void loop() {
25     // Teste, ob der Taster an I1 gedrückt ist
26     if(ftduino.input_get(Ftduino::I1)) {
27         // Motor bremsen
28         ftduino.motor_set(Ftduino::M1, Ftduino::BRAKE);
29         // interne rote LED einschalten
30         digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
31     }
32 }
```

Sketchbeschreibung

Der Sketch ist sehr kurz und einfach. In der `setup()`-Funktion wird in Zeile 15 bei Sketchstart der Motor gestartet. Zusätzlich wird in den Zeilen 18 bis 20 die rote interne Leuchtdiode des **fTDUINO** für die spätere Verwendung aktiviert, aber zunächst ausgeschaltet gelassen.

In der `loop()`-Funktion wird in Zeile 26 permanent abgefragt, ob der Not-Aus-Taster geschlossen wurde. Ist das der Fall, dann wird der Motor in Zeile 28 sofort gestoppt und in Zeile 30 die rote Leuchtdiode eingeschaltet. Der Motor wird bewusst per `BRAKE` gestoppt statt `OFF`. Auf diese Weise wird der Motor kurzgeschlossen und aktiv gebremst, während er andernfalls langsam auslaufen würde, was im Notfall eine Gefahr darstellen würde.

Aufgabe 1: Kabelbruch

Not-Taster sind zwar an vielen Maschinen vorhanden. Glücklicherweise werden sie aber nur sehr selten wirklich benötigt. Das hat den Nachteil, dass kaum jemand bemerken wird, wenn mit dem Not-Aus-Taster etwas nicht stimmt. Anfälliger als der Taster selbst sind oft die Kabel und es kann im Arbeitsalltag leicht passieren, dass ein Kabel beschädigt wird. Oft sieht man das dem Kabel nicht an, wenn z.B. die Ummantlung unbeschädigt aussieht, durch zu starke Belastung aber dennoch die Kupferleiter im Inneren unterbrochen sind. Der Resultat ist ein sogenannter Kabelbruch.

Du musst kein Kabel durchreissen. Es reicht, wenn Du einen der Stecker am Kabel, das den Taster mit dem **ftDuino** verbindet, heraus ziehst. Der Not-Aus-Taster funktioniert dann nicht mehr und die Maschine lässt sich nicht stoppen. Eine gefährliche Situation.

Lösung 1:

Die Lösung für das Problem ist überraschend einfach. Wir haben unseren Not-Aus-Taster als Schließer angeschlossen. Das bedeutet, dass der Kontakt geschlossen wird, wenn der Taster betätigt wird. Man kann den fischertechnik-Taster aber auch als Öffner verwenden. Der Kontakt ist dann im Ruhezustand geschlossen und wird bei Druck auf den Taster geöffnet.

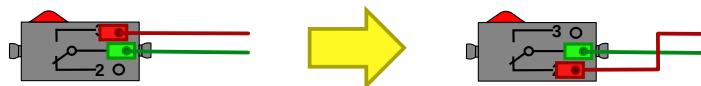


Abbildung 6.3: Kabelbruch-sicherer Not-Aus-Öffner

Mit dem aktuellen Sketch geht die Maschine bei einem Kabelbruch sofort in den Notzustand, da der Taster ja sofort als geschlossen erkannt wird. Also muss auch im Sketch die Logik herum gedreht werden. Das passiert durch folgende Änderung in Zeile 26:

```
26     if (!ftduino.input_get(Ftdduino::I1)) {
```

Man muss genau hinschauen, um den Unterschied zu sehen. Hinter der öffnenden Klammer steht nun aus Ausrufezeichen, das in der Programmiersprache C für die logische Negation eines Ausdrucks steht. Die Bedingung wird nun also ausgeführt, wenn der Taster *nicht* geschlossen ist. Nach dieser Änderung sollte sich die Maschine wieder genau wie ursprünglich verhalten. Mit einer kleinen Änderung: Zieht man nun einen der Stecker am Not-Aus-Taster heraus, so stoppt die Maschine sofort. Bei einem Kabelbruch würde das ebenfalls passieren.

So eine Schaltung nennt man auf englisch "Fail-Safe": Wenn etwas kaputt geht, dann wechselt die Schaltung in einen sicheren Zustand. Der fischertechnik-3D-Drucker verwendet diese Schaltung zum Beispiel für die Endlagentaster. Ist hier ein Kabel abgerissen, dann fährt der Drucker seine Motoren nicht gewaltsam gegen die Endanschläge der Achsen. Stattdessen verweigert der Drucker die Arbeit komplett, sobald die Verbindung zu einem Endlagentaster unterbrochen ist.

Expertenaufgabe:

Ein Kabel kann nicht nur unterbrochen werden. Es kann auch passieren, dass ein Kabel z.B. so stark gequetscht wird, dass die inneren Leiter Kontakt miteinander bekommen. Das passiert wesentlich seltener, stellt aber ebenfalls eine realistische Gefahr dar.

Vor diesem Fall würde unsere verbesserte Notschaltung nicht schützen und der Not-Aus-Taster würde in dem Fall wieder nicht funktionieren. Wir brauchen also eine Variante, bei der weder der geschlossene noch der offene Zustand der Verbindung als "gut" erkannt wird.

Lösung:

Die Lösung ist in diesem Fall etwas aufwändiger. Es müssen nun mindestens drei Zustände unterschieden werden: "normal", "unterbrochen" und "kurzgeschlossen". Reine Schalteingänge können aber nur die beiden Zustände "geschlossen" und "offen" unterscheiden.

Die Lösung ist, die analogen Fähigkeiten der Eingänge zu nutzen. Dazu kann man z.B. direkt am Taster einen 100Ω -Widerstand in die Leitung integrieren.

Im Normalfall ist der Taster geschlossen und der am Eingang I1 zu messende Widerstand beträgt 100Ω . Ist die Leitung unterbrochen, dann ist der Widerstand unendlich hoch. Und ist die Leitung kurzgeschlossen, dann ist der Widerstand nahe 0Ω . Die Maschine darf also nur dann laufen, wenn der Widerstand nahe an 100Ω ist. Etwas Toleranz ist nötig, da der genau Wert des verwendeten Widerstands Fertigungstoleranzen unterworfen ist und auch der geschlossene Taster sowie sein Anschlusskabel über einen eigenen sehr geringen Widerstand verfügen, der den gemessenen Gesamtwiderstand beeinflusst.

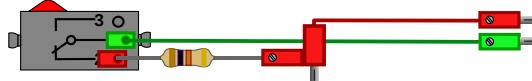


Abbildung 6.4: Gegen Kabelbruch und Kurzschluss sicherer Not-Aus

Warum muss der Widerstand nahe am Taster angebracht werden? Was passiert, wenn er nahe am ftDuino eingesetzt wird und dann ein Kurzschluss im Kabel zwischen Widerstand und Taster auftritt?

6.3 Pulsweitenmodulation

Schwierigkeitsgrad: ★★★★☆

Wenn man eine Lampe mit variierender Helligkeit leuchten lassen möchte oder einen Motor mit regelbarer Geschwindigkeit laufen lassen will, dann benötigt man eine Möglichkeit, die Energieaufnahme der Lampe oder des Motors zu beeinflussen. Am einfachsten klappt das mit einer einstellbaren Spannungsquelle. Bei höherer Spannung steigt auch die Energieaufnahme der Lampe und sie leuchtet heller und der Motor dreht sich schneller, bei niedrigerer Spannung wird die Lampe dunkler und der Motor dreht sich langsamer. Für die Analogausgänge des ftDuino bedeutet das, dass sie eine zwischen 0 und 9 Volt kontinuierlich (analog) einstellbare Spannung ausgeben können sollen, um Lampen und Motoren von völliger Dunkelheit bzw. Stillstand bis zu maximaler Helligkeit bzw. Drehzahl betreiben zu können.

Der Erzeugung variabler Spannungen ist technisch relativ aufwändig. Es gibt allerdings einen einfachen Weg, ein vergleichbares Ergebnis zu erzielen. Statt die Spannung zu senken schaltet man die Spannung periodisch nur für sehr kurze Momente ein. Schaltet man die Spannung z.B. nur 50% der Zeit ein und 50% der Zeit aus, so wird über die Gesamtzeit gesehen nur die Hälfte der Energie übertragen. Ob man das Ergebnis als Blinken der Lampe oder als Stottern des Motors wahrnimmt oder ob die Lampe einfach mit halber Helligkeit leuchtet und der Motor mit halber Drehzahl dreht ist von der Geschwindigkeit abhängig, mit der man die Spannung ein- und ausschaltet.

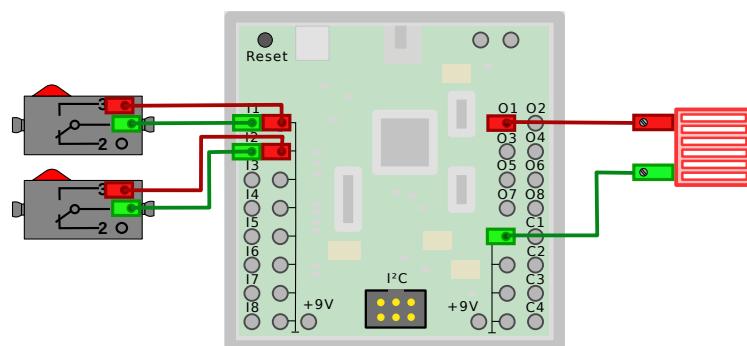


Abbildung 6.5: Pulsweitenmodulation

6.3.1 Sketch Pwm

```

1  /*
2   Pwm - Pulsweitenmodulation
3
4   (c) 2017 by Till Harbaum <till@harbaum.org>
5 */
6
7 #include <FtdduinoSimple.h>
8
9 uint16_t schaltzeit = 8192; // 8192 entspricht je 1/2 Sekunde an und aus
10
11 // Die Setup-Funktion wird einmal ausgeführt, wenn Reset gedrückt oder
12 // das Board gestartet wird.

```

```

13 void setup() { }
14
15 // warte die angegebene Zeit. Der "zeit"-Wert 8192 soll dabei einer halben Sekunde
16 // entsprechen. Es muss also "zeit" mal 500000/8192 Mikrosekunden gewartet werden
17 void warte(uint16_t zeit) {
18     while(zeit--)
19         _delay_us(500000/8192);
20 }
21
22 // Die Loop-Funktion wird endlos immer und immer wieder ausgeführt
23 void loop() {
24     static uint8_t an_aus = false;          // der aktuelle Ausgang-an/aus-Zustand
25     static uint8_t i1=false, i2=false;      // letzter Zustand der Tasten an I1 und I2
26
27     // ist die Taste an I1 gedrückt?
28     if(ftduino.input_get(Ftdduino::I1)) {
29         // und war die Taste vorher nicht gedrückt und ist die
30         // aktuelle Schaltzeit kleiner 8192?
31         if(!i1 && (schaltzeit < 8192)) {
32             // dann verdopple die Schaltzeit
33             schaltzeit *= 2;
34             // warte eine Millisekunde, falls die Taste nachprellt
35             _delay_ms(1);
36         }
37         // merke, dass die Taste an I1 zur Zeit gedrückt ist
38         i1 = true;
39     } else
40         // merke, dass die Taste an I1 zur Zeit nicht gedrückt ist
41         i1 = false;
42
43     // ist die Taste an I2 gedrückt?
44     if(ftduino.input_get(Ftdduino::I2)) {
45         // und war die Taste vorher nicht gedrückt und ist die
46         // aktuelle Schaltzeit größer 1?
47         if(!i2 && (schaltzeit > 1)) {
48             // dann halbiere die Schaltzeit
49             schaltzeit /= 2;
50             // warte eine Millisekunde, falls die Taste nachprellt
51             _delay_ms(1);
52         }
53         // merke, dass die Taste an I2 zur Zeit gedrückt ist
54         i2 = true;
55     } else
56         // merke, dass die Taste an I2 zur Zeit nicht gedrückt ist
57         i2 = false;
58
59     // schalte den Ausgang 01 je nach Zustand der an_aus-Variable an oder aus
60     if(an_aus)
61         // wenn der aktuelle an_aus-Zustand wahr ist, dann schalte den Ausgang ein
62         ftdduino.output_set(Ftdduino::O1, Ftdduino::HI);
63     else
64         // wenn der aktuelle an_aus-Zustand unwahr ist, dann schalte den Ausgang aus
65         ftdduino.output_set(Ftdduino::O1, Ftdduino::OFF);
66
67     // warte die aktuelle Schaltzeit
68     warte(schaltzeit);
69
70     // wechselt den an_aus-Zustand
71     an_aus = !an_aus;
72 }

```

Sketchbeschreibung

Der Sketch schaltet den Ausgang O1 in der loop()-Funktion in den Zeilen 60 bis 71 kontinuierlich ein und aus. Je nach Wert der Variable an_aus wird der Ausgang in Zeile 62 auf 9 Volt (HI) geschaltet oder in Zeile 65 ausgeschaltet (von der Spannungsversorgung getrennt). In Zeile 71 wird in jedem Durchlauf der loop()-Funktion der Zustand der Variable an_aus gewechselt, so dass der Ausgang im in jedem Durchlauf im Wechsel ein- und ausgeschaltet wird.

Nach jeden An/Aus-Wechsel wird in Zeile 68 etwas gewartet. Wie lange gewartet wird steht in der Variablen schaltzeit. Sie gibt die Wartezeit in $1/8192$ halben Sekunden an. Dazu wird in der Funktion wait() in Zeile 19 so oft $500000/8192$

Mikrosekunden gewartet wie in der Variablen `schaltzeit` angegeben. Warum halbe Sekunden? Weil zweimal pro Zyklus gewartet wird, einmal wenn der Ausgang eingeschaltet ist und einmal wenn er ausgeschaltet ist. Wird jeweils eine halbe Sekunde gewartet, so dauert der gesamte Zyklus eine Sekunde und der Ausgang wird einmal pro Sekunde für eine halbe Sekunde eingeschaltet. Der Ausgang wechselt also mit einer Frequenz von $1/\text{Sek.}$ oder einem Hertz.

Durch einen Druck auf den Taster an `I1` (Zeile 28) kann der Wert der Variablen `schaltzeit` verdoppelt (Zeile 33) und mit einem Druck auf den Taster an `I2` (Zeile 44) halbiert (Zeile 49) werden. Dabei wird der Wert von Schaltzeit auf den Bereich von 1 (Zeile 47) und 8192 (Zeile 31) begrenzt. Nun wird auch klar, warum dieser merkwürdig "krumme" Wert 8192 gewählt wurde: Da 8192 eine Zweierpotenz (2^{13}) ist lässt der Wert sich ohne Rundungsfehler bis auf 1 hinunterteilen und wieder hochmultiplizieren.

Da die Tasten nur beim Wechsel zwischen an und aus abgefragt werden muss man den Taster bei niedrigen Frequenzen einen Moment gedrückt halten, bis sich die Blinkfrequenz verändert.

Wenn der Sketch startet leuchtet die Lampe einmal pro Sekunde für eine halbe Sekunde auf. Ein (langer) Druck auf den Taster an `I2` halbiert die Wartezeit und die Lampe blinkt zweimal pro Sekunde. Nach einem zweiten Druck auf den Taster blinkt sie viermal usw. Nach dem sechsten Druck blinkt sie 32 mal pro Sekunde, was nur noch als leichtes Flackern wahrnehmbar ist und nach dem siebten Druck gar 64 mal. Frequenzen oberhalb circa 50 Hertz kann das menschliche Auge nicht mehr auflösen und die Lampe scheint mit halber Helligkeit zu leuchten. Die Frequenz weiter zu erhöhen hat dann keinen erkennbaren Effekt mehr.

Aufgabe 1: Die träge Lampe

Es ist in diesem Aufbau nicht nur das menschliche Auge, das träge ist. Die Lampe ist ebenfalls träge. Es dauert eine Zeit, bis sich ihr Glühfaden aufheizt und die Lampe leuchtet und es dauert auch eine Zeit, bis sich der Glühfaden wieder so weit abkühlt, dass die Lampe nicht mehr leuchtet.

Wesentlich schneller als Glühlampen sind Leuchtdioden. In ihnen muss sich nichts aufheizen oder abkühlen, sondern das Licht entsteht direkt durch optoelektrische Effekte im Halbleitermaterial der Leuchtdiode. Schließt man statt der Lampe eine Leuchtdiode an (rot markierter Anschluss an Ausgang 01), dann sieht das Verhalten zunächst ähnlich aus und wieder scheint ab einer Frequenz von 64 Hertz die Leuchtdiode gleichmäßig mit halber Helligkeit zu leuchten. Viele Menschen nehmen 64 Hz allerdings noch als leichtes Flimmern wahr und erst ab 100Hz redet man von einer wirklich flimmerfreien Darstellung.

Man kann das Flimmern der Leuchtdiode aber auch bei diesen Frequenzen noch beobachten, wenn sich die Leuchtdiode bewegt. Nutzt man ein etwas längeres Kabel, so dass die Leuchtdiode sich frei bewegen lässt und bewegt sie dann in einer etwas abgedunkelten Umgebung schnell hin- und her, so wird der Eindruck einer Reihe von unterbrochenen Leuchtstreifen entstehen.

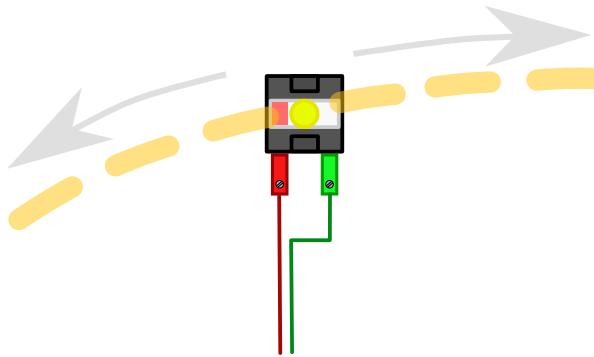


Abbildung 6.6: Muster bei schneller Bewegung der flackernden Leuchtdiode

Je höher die PWM-Frequenz ist, desto kürzer sind die sichtbaren Leuchtstreifen.

Dieses Experiment kann man auch mit der Lampe wiederholen. Durch die Trägheit der Lampe sieht man nur einen durchgehenden Leuchtstreifen. Allerdings sollte man nicht allzu wild vorgehen, da der empfindliche Glühfaden einer leuchtenden Lampe bei Erschütterung leicht kaputt geht. Leuchtdioden sind auch in dieser Beziehung robust und lassen sich selbst von starken Erschütterungen nicht beeindrucken.

Aufgabe 2: Töne aus dem Motor

Ein Motor ist ebenfalls träge und nicht in der Lage, beliebig schnellen An-/Aus-Signalen zu folgen. Schon bei recht niedrigen PWM-Frequenzen dreht sich der Motor kontinuierlich mit halber Drehzahl. Das dabei vornehmlich zu vernehmende Geräusch ist das Laufgeräusch des Motors.

Wenn man den Motor aber mechanisch blockiert, indem man ihn z.B. mit der Hand festhält, dann wird das Laufgeräusch unterdrückt und ein anderer Effekt wird hörbar: Die Spulen im Motor wirken wie ein Lautsprecher und man kann die PWM-Frequenz bei blockiertem Motor als Ton hören. Eine Veränderung der PWM-Frequenz hat dabei einen deutlich hörbaren Unterschied der Tonhöhe zur Folge.

Je höher die PWM-Frequenz, desto höher der am blockierten Motor hörbare Ton.

Aufgabe 3: Nachteil hoher PWM-Frequenzen

Im Fall der Lampe scheint eine höhere PWM-Frequenz ein reiner Vorteil zu sein, da das Flimmern mit höherer Frequenz abnimmt. Am Motor kann aber ein negativer Effekt beobachtet werden.

Läuft der Motor frei, so hängt die gehörte Tonhöhe des Motor-Laufgeräusches mit seiner Drehgeschwindigkeit zusammen, während das PWM-Geräusch der vorigen Aufgabe in den Hintergrund tritt. Je schneller der Motor dreht, desto höher die Frequenz des Laufgeräusches und umgekehrt.

Erhöht man nun die PWM-Frequenz, dann sinkt die Frequenz der Töne, die der Motor abgibt leicht. Er wird offensichtlich mit steigender PWM-Frequenz langsamer. Dieser Effekt ist damit zu erklären, dass der Motor eine sogenannte induktive Last darstellt. Er besteht im Wesentlichen aus Spulen, sogenannten Induktoren. Der Widerstand einer induktiven Last ist abhängig von der Frequenz einer angelegten Wechselspannung. Und nichts anderes ist das durch die PWM erzeugte An-/Aus-Signal. Je höher die Frequenz, desto höher der Widerstand der Spule und es fließt weniger Strom durch die Spule.

Es ist technisch möglich, die Ausgangsspannung zu glätten und diesen Effekt zu mildern. Diese Auslegung so einer Glättung ist allerdings von der verwendeten PWM-Frequenz und der Stromaufnahme des Motors abhängig. Außerdem beeinflusst sie das generelle Schaltverhalten des Ausgangs. Der Einsatz einer entsprechenden Glättung im [ftDuino](#) kommt daher nicht in Frage, da die universelle Verwendbarkeit der Ausgänge dadurch eingeschränkt würde.

Ziel bei der Auswahl der PWM-Frequenz ist also eine Frequenz, die hoch genug ist, um Lampenflackern oder Motorstottern zu verhindern, die aber dennoch möglichst gering ist, um induktive Widerstände in den Wicklungen der Motoren zu minimieren. Eine PWM-Frequenz von 100-200Hz erfüllt diese Bedingungen.

Motordrehzahl in Abhängigkeit des PWM-Verhältnisses

Die Motordrehzahl lässt sich durch das Verhältnis der An- und Ausphasen während der Pulsweitenmodulation beeinflussen. In den bisherigen Versuchen waren die An- und Ausphase jeweils gleich lang. Verändert man das Verhältnis der beiden Phasen, dann lässt sich die Helligkeit einer Lampe oder die Drehzahl eines Motors steuern. Die PWM-Frequenz kann dabei konstant bleiben.

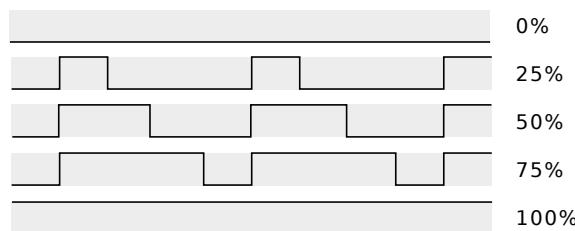


Abbildung 6.7: Ausgewählte PWM-Verhältnisse von 0 bis 100%

Je länger die eingeschaltete Phase gegenüber der ausgeschalteten, desto heller leuchtet die Lampe und desto schneller dreht der Motor. Der genaue Zusammenhang zwischen Lampenhelligkeit und PWM-Verhältnis ist mangels entsprechender Messmöglichkeit nicht einfach festzustellen. Die sogenannten Encoder-Motoren haben aber eine eingebaute Möglichkeit zur Geschwindigkeitsmessung. Im Fall der TXT-Encodermotoren erzeugen diese Encoder 63 Signalimpulse pro Umdrehung der

Achse. Man kann also durch Auswertung der Encodersignale an den Zählereingängen des ftDuino die Drehzahl des Motors feststellen.

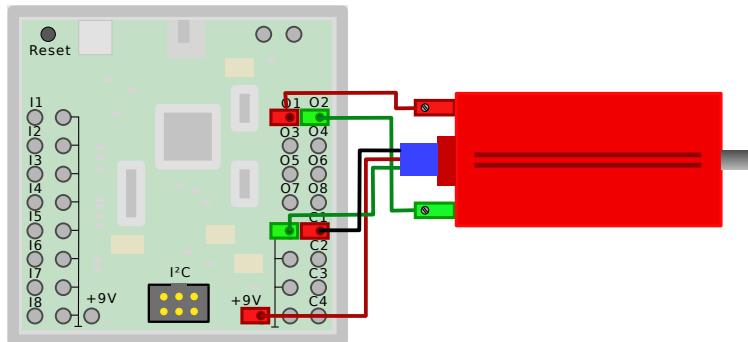


Abbildung 6.8: Anschluss des TXT-Encoder-Motors zur PWM-abhängigen Drehzahlmessung

Das Beispiel `Datei > Beispiele > Ftduino > PwmSpeed` regelt das An-/Ausverhältnis der PWM langsam von 0 auf 100% hoch und misst dabei kontinuierlich für jeweils eine Sekunde die am Eingang C1 anliegenden Impulse. Diese werden in Umdrehungen pro Minute umgerechnet und ausgegeben. Dabei kommt die vollständige Bibliothek Ftduino zum Einsatz, die die eigentliche Erzeugung der PWM-Signale bereits mitbringt. Die Erzeugung des PWM-Signals passiert vollständig im Hintergrund, so dass der Sketch selbst lediglich den Motor startet und dann eine Sekunde wartet.

Speist man die so gewonnenen Daten in den sogenannten "seriellen Plotter", der sich im Menü der Arduino-IDE unter `Werkzeuge > Serieller Plotter` befindet, so kann man die Messergebnisse anschaulich visualisieren.

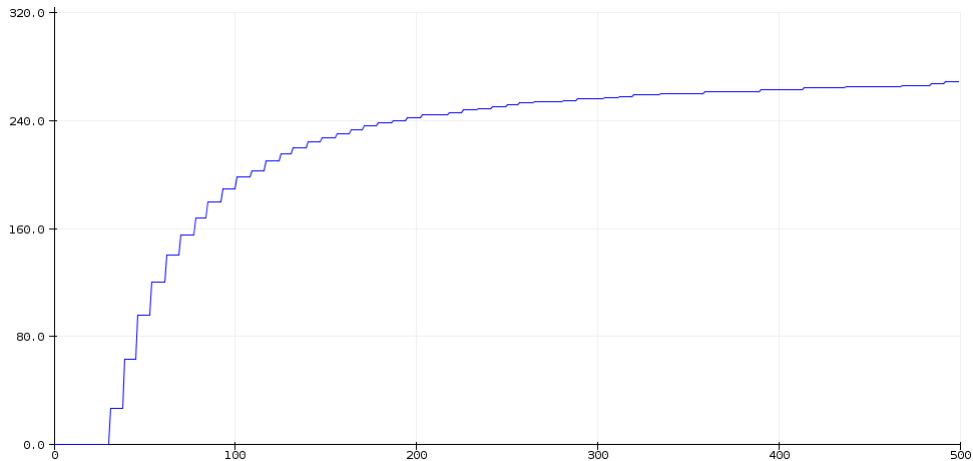


Abbildung 6.9: Leerlaufdrehzahl des TXT-Encoder-Motors in Abhängigkeit des PWM-Verhältnisses

Auf der horizontalen Achse ist das PWM-Verhältnis aufgetragen, beginnend mit "dauerhaft aus" ganz links bis "dauerhaft an" ganz rechts. Auf der vertikalen Achse ist die gemessene Drehzahl in Umdrehungen pro Minute dargestellt. Man sieht, dass der Zusammenhang im Leerlauf nicht linear ist. Bereits bei nur circa 25% der Zeit eingeschaltetem Signal wird 90% der maximalen Motordrehzahl erreicht.

Man kann z.B. indem man den Motor eine konstante Last anheben lässt nachprüfen, wie sich diese Kurve und Last verändert.

6.4 Schrittmotoransteuerung

Schwierigkeitsgrad: ★★★★☆

Gängige Elektromotoren, wie sie üblicherweise in Spielzeug eingesetzt werden sind sogenannte Asynchronmotoren. Diese in der Regel mit Gleichspannung versorgten Motoren zeichnen sich dadurch aus, dass sie beim Anlegen einer Spannung sofort

anfangen, sich zu drehen. Die Drehzahl richtet sich dabei nur indirekt nach äußeren Einflüssen und der Motor dreht letztlich so schnell es ihm möglich ist. Für viele Anwendungen ist diese Art Motor sehr gut geeignet. Modellautos lassen sich ohne weitere Steuerung motorisieren und fahren auf mit diesen Motoren so schnell wie gerade möglich. Auch fischertechnik setzt diese Motoren in den meisten Fällen ein und der **ftDuino** erlaubt es, sie direkt an jeweils einen Motorausgang M1 bis M4 anzuschließen.

Aber es gibt Anwendungen, in denen diese Motorfamilie sehr große Schwächen zeigt. So ist es sehr schwierig, mit einfachen Asynchronmotoren eine exakte Drehzahl zu erreichen bzw. eine exakte Position anzufahren. Die Encoder-Motoren von fischertechnik versuchen dies durch zusätzliche Hardware zu ermöglichen. Aber auch diesem Vorgehen sind Grenzen gesetzt, speziell bei den fischertechnik-Encoder-Motoren, die nicht in der Lage sind, die Drehrichtung zu erfassen.

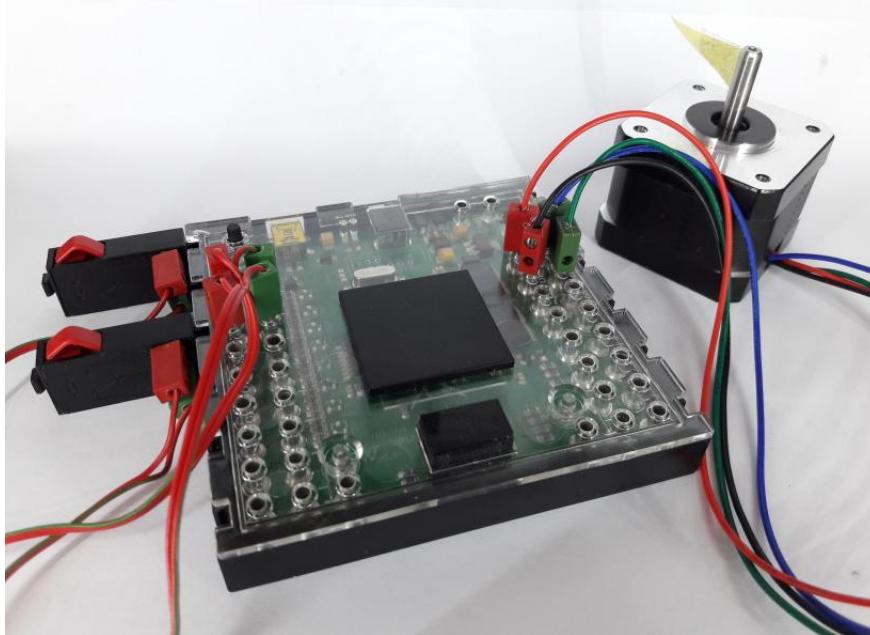


Abbildung 6.10: 17HS13-Schrittmotor am **ftDuino**

Für Aufgaben, bei denen es auf exaktes reproduzierbares Verhalten des Motors ankommt, gibt synchron arbeitende Motoren wie die sogenannten Schrittmotoren. Gängige Anwendungen dafür sind heutzutage Scanner und 3D-Drucker, aber auch die früher verwendeten Diskettenlaufwerke und frühe Festplatten verwendeten Schrittmotoren. Erkennbar ist die Nutzung von Schrittmotoren auch am charakteristischen Betriebsgeräusch, das findige Tüftler sogar nutzen, um mit solchen Motoren Musik zu erzeugen¹.

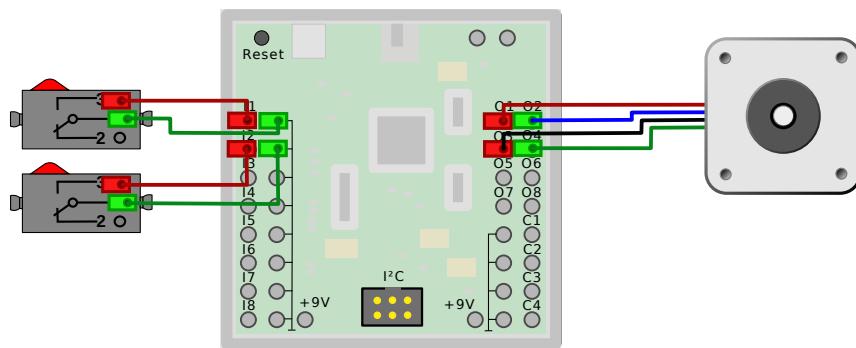


Abbildung 6.11: Anschluss des Schrittmotors an den **ftDuino**

Gängige Schrittmotoren bestehen aus einem drehbar gelagerten Anker aus Permanentmagneten, der von Elektromagneten umgeben ist. Der Permanentmagnet richtet sich entsprechend den ihm umgebenden Magnetfeldern aus. Im Spannungslosen

¹Im Internet leicht zu finden unter dem Stichwort "Floppymusik"

Zustand lässt sich die Achse des Motors vergleichsweise leicht drehen. Der dabei spürbare Widerstand resultiert daraus, dass der Permanentmagnet von den Eisenkernen der Elektromagnete auch im spannungslosen Zustand angezogen wird.

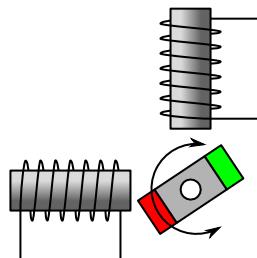


Abbildung 6.12: Vereinfachtes Schema eines Schrittmotors

Der in der Abbildung dargestellte vereinfachte Schrittmotor verfügt über einen Permanentmagnet und zwei Elektromagnete. Reale Schrittmotoren haben in der Regel mehr als zwei Spulen und der Anker bildet auch mehr als nur zwei magnetische Pole ab. Auf das Funktionsprinzip hat diese Vereinfachung keine Auswirkungen.

Übliche sogenannte bipolare Schrittmotoren verfügen über vier Anschlüsse, jeweils zwei für jeden der beiden Elektromagneten. Durch Anlegen einer Spannung werden die Elektromagnete magnetisiert. In der Folge richtet sich der Anker entsprechend aus. Die Polarität der angelegten Spannung bestimmt die Richtung des Magnetfelds der Elektromagneten.

6.4.1 Vollschriftsteuerung

Sind immer beide Spulen unter Spannung, so gibt es vier verschiedene Ausrichtungen der beiden Elektromagnetfelder und der Anker nimmt jeweils vier unterschiedliche Positionen ein. Wird eine entsprechende sich wiederholende Signalfolge an die Elektromagnete angelegt, so folgt der Anker den Signalen und dreht sich. Er folgt dabei exakt den sich wechselnden Magnetfeldern und dreht sich synchron zum angelegten Signalmuster. Geschwindigkeit und Position des Motors sind auf diese Weise exakt vorhersagbar. Sind immer alle Spulen unter Spannung und durchläuft der Zyklus daher genau vier Zustände, so spricht man von einer Vollschriftsteuerung.

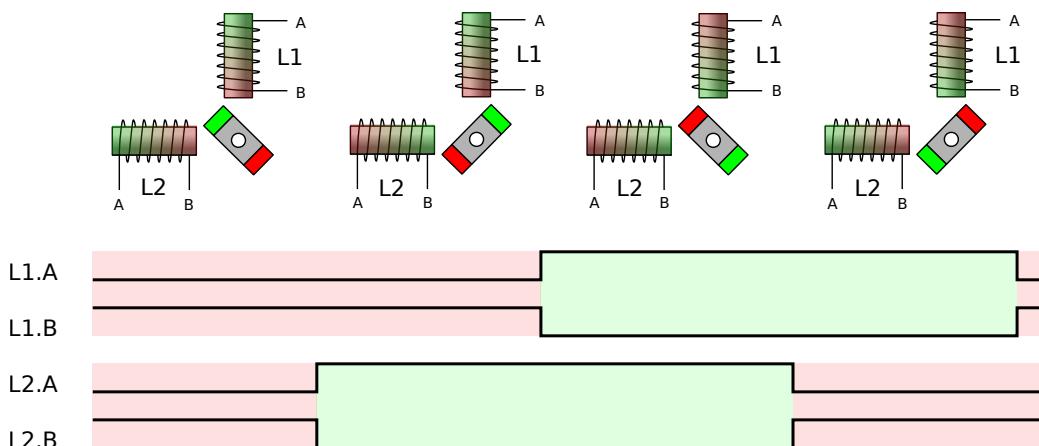


Abbildung 6.13: Vollschriftsteuerung eines Schrittmotors

Ein Sketch, der kontinuierlich das entsprechende Signalmuster erzeugt sieht folgendermaßen aus:

```
while(1) {
    ftduino.motor_set(Ftduino::M1, Ftduino::LEFT);
    delay(5);
    ftduino.motor_set(Ftduino::M2, Ftduino::LEFT);
    delay(5);
    ftduino.motor_set(Ftduino::M1, Ftduino::RIGHT);
    delay(5);
    ftduino.motor_set(Ftduino::M2, Ftduino::RIGHT);
```

```
    delay(5);
}
```

Ein vollständiges Beispiel findet sich in der Arduino-IDE unter [Datei > Beispiele > FtduinoSimple > StepperMotor](#).

Während sich der dargestellte vereinfachte Schrittmotor pro Signaländerung um 90° dreht und daher nach vier Schritten eine volle Umdrehung absolviert hat haben reale Schrittmotoren eine höhere Auflösung. Gängig ist ein Schrittewinkel von $1,8^\circ$. Erst nach 200 Schritten hat sich so ein Motor einmal komplett gedreht. Da im abgebildeten Listing nach jedem Schritt 5ms gewartet wird werden genau 200 Schritte pro Sekunde erzeugt. Ein gängiger $1,8^\circ$ -Motor würde sich genau einmal pro Sekunden drehen.

Für die Experimente am [ftDuino](#) muss ein Motor gewählt werden, der mit den 9V-Ausgängen des [ftDuino](#) kompatibel ist. Der hier verwendete 17HS13 ist für eine Betriebsspannung von 12V ausgelegt, arbeitet aber auch mit den fischertechnik-üblichen 9 Volt zuverlässig. Die Motoren des fischertechnik-Plotters 30571² von 1985 waren für 6 Volt ausgelegt. Sollen diese Motoren am [ftDuino](#) betrieben werden, so ist dieser mit 6 statt den üblichen 9 Volt zu versorgen.

Die Abbildungen der Abläufe beinhalten in der unteren Hälfte jeweils die Signalverläufe an den vier Anschlüssen des Motors. Die Signalverläufe sind farblich entsprechend der sich ergebenden Magnetfeldrichtung hinterlegt. Man sieht, wie die beiden Anschlüsse eines Magneten immer genau gegenteilig angesteuert werden und sich das Magnetfeld beim Wechsel der Signale ändert. Die abgebildete Farbe entspricht jeweils der Polarität der dem Anker zugewandten Seite des Elektromagneten.

6.4.2 Halbschrittsteuerung

Eine höhere Winkel-Auflösung erreicht man, wenn man den Schrittmotor im sogenannten Halbschrittbetrieb ansteuert. Der Signalzyklus besteht in dem Fall nicht mehr aus vier sondern aus acht Schritten. In jedem zweiten Schritt wird einer der beiden Elektromagneten abgeschaltet, so dass sich der Anker nur nach dem verbliebenen Magneten ausrichtet. Die sich dadurch ergebenden vier Zwischenzustände sind von den resultierenden Winkel genau zwischen den vier Zuständen der Vollschrittsteuerung angeordnet. Der Motor kann also die doppelt so viele Winkel ansteuern und entsprechend genauer positioniert werden.

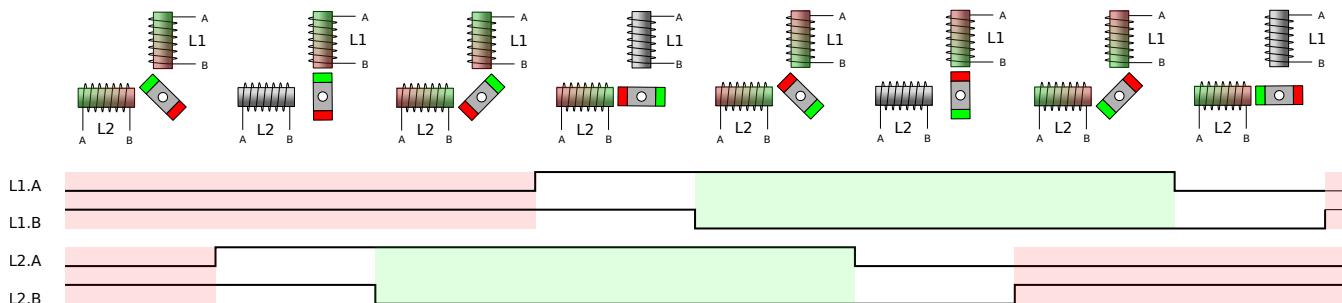


Abbildung 6.14: Halbschrittsteuerung eines Schrittmotors

In der Abbildung ist sichtbar, dass sich die beiden Signale zur Ansteuerung eines Elektromagneten nicht mehr gleichzeitig ändern, sondern dass es einen Versatz gibt, währenddessen beide Signale auf gleichem Pegel liegen. Der Magnet steht zu dieser Zeit nicht unter Spannung und hat kein Magnetfeld. Die Signalverläufe sind zu dieser Zeit daher nicht farbig hinterlegt.

Der Nachteil der Halbschrittsteuerung liegt darin, dass in den Zeiten, in denen nur ein Elektromagnet aktiv ist die Kraft des Motors reduziert ist.

Timer-Interrupt betriebener Schrittmotor

Der im vorhergehenden Abschnitt verwendete Sketch zur Schrittmotoransteuerung hat vor allem einen großen Vorteil: Er ist anschaulich. Das Problem ist aber, dass die Ansteuerung Motors permanente Signalwechsel benötigt und daher die Motorfunktionen im Sketch permanent aktiv sein müssen, damit der Motor sich dreht. Der Sketch verbringt praktisch die ganze Zeit damit in den diversen `delay()`-Funktionsaufrufen, auf den nächsten Signalwechsel zu warten. Der größte

²fischertechnik-Datenbank: <https://ft-datenbank.de/tickets?fulltext=30571>

Nachteil: Während der Sketch einen Motor bedient kann er kaum etwas anderes tun. Einen zweiten Motor gleichzeitig mit gegebenenfalls sogar unterschiedlicher Drehzahl laufen zu lassen ist mit diesem einfachen Sketch kaum zu realisieren.

Das gleiche Problem stellte sich während der Entwicklung des **ftDuino** bereits mit den übrigen Komponenten des **ftDuino** auch die Auswertung der Analogeingänge, die PWM-Drehzahlregelung der Motorausgänge und die Auswertung der Zähler beanspruchen permanent eine aktive Mitarbeit des Mikrocontrollers. Trotzdem muss der Anwender dafür in seinem Sketch keine Funktion vorsehen. All diese Dinge passieren weitgehend unbemerkt im Hintergrund. Solch eine Hintergrundfunktion wäre auch für den Betrieb des Schrittmotors wünschenswert.

Mikrocontroller wie der ATmega32u4 des **ftDuino** bestehen aus einem Mikroprozessor (der eigentlichen Recheneinheit) und diversen zusätzlichen Hardwarekomponenten wie z.B. USB-Schnittstellenfunktionen. Unter anderem verfügt der ATmega32u4 über einige sogenannte Timer. Einen Timer kann man sich wie eine unabhängig vom eigentlichen Prozessor arbeitende Uhr vorstellen. Man kann per Software festlegen, wie schnell die Uhr laufen soll und ob zu bestimmten Zeitpunkten gegebenenfalls bestimmte Dinge passieren sollen, aber das eigentliche Fortschreiten der Uhrzeit geschieht automatisch und ohne weiteres Zutun eines auf dem Prozessor ausgeführten Sketches. Eines der Dinge, die von so einem Timer regelmäßig ausgelöst werden können ist eine sogenannte Unterbrechungsanforderung (englisch Interrupt). Sie veranlasst den Prozessor, zu unterbrechen, was auch immer er gerade tut und sich für kurze Zeit einer anderen Aufgabe zu widmen.

Diese Art von Unterbrechung ist ideal, um z.B. einen Schrittmotor zu steuern. Soll der Schrittmotor z.B. 200 Schritte pro Sekunde bewegt werden, so kann ein Timer so programmiert werden, dass der Prozessor alle 5 Millisekunden unterbrochen wird. In dieser Unterbrechung muss der Prozessor dann das Magnetfeld des Motors einen Schritt weiter drehen und sich dann wieder seiner normalen Aufgabe widmen.

Das folgende Code-Segment programmiert den Timer 1 des ATmega32u4 so, dass die sogenannte Interrupt-Service-Routine exakt alle 5 Millisekunden ausgeführt wird. Der Motor ließe sich so durch passenden Programmcode innerhalb dieser Routine völlig unabhängig vom Hauptprogramm des Sketches betreiben.

```

1 #include <FtduinoSimple.h>
2
3 // die sogenannte Interrupt-Service-Routine (ISR) wird
4 // nicht vom Sketch selbst zur Ausführung gebracht, sondern
5 // die Hardware des ATmega32u$ löst die Ausführung auf Basis
6 // eines Timer-Ereignisses aus
7 ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
8     // Diese Funktion wird alle 5ms ausgeführt.
9     // Das Weiterdrehen des Schrittmotor-Magnetfeldes
10    // könnte z.B. hier geschehen.
11    // ...
12 }
13
14 void setup() {
15     // Konfiguration des Timer 1 des ATmega32u4, die genaue
16     // Beschreibung der Register findet sich in Kapitel 14
17     // des Datenblatt:
18     // http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7766-8-bit-AVR-ATmega16U4-32
19     // U4_Datasheet.pdf
20
21     // Timer 1 soll im sogenannten CTC-Modus schalten mit OCR1A
22     // als obere Grenze. Der Timer läuft mit 1/256 CPU-Takt. Dieser
23     // wiederum beträgt 16 MHz, der Timer läuft also mit 62,5 kHz.
24     // Um den Motor 200 Schritte pro Sekunde zu drehen muss der
25     // Motor immer dann einen Schritt machen, wenn der Timer 312
26     // (62500/200) seiner Zählschritte durchlaufen hat.
27     TCCR1A = 0;
28     TCCR1B = (1<<WGM12) | (1<<CS12); // Starte Timer 1 mit 1/256 F_CPU = 62.5kHz
29     TCCR1C = 0;
30
31     // Ereignis auslösen wenn 62400/200 Zählerschritte erreicht sind
32     TCNT1 = 0;
33     OCR1A = 62500/200;
34
35     // Ereigniserzeugung bei Erreichen der Zielschritte auslösen
36     TIMSK1 = (1<<OCIE1A);
37 }
38 void loop() {
39     // die Hauptroutine kann beliebig genutzt werden und
40     // der Timer 1-Interrupt wird unabhängig regelmäßig
41     // ausgeführt

```

42 }

Das vollständige Beispiel findet sich unter Datei > Beispiele > FtduinoSimple > StepperMotorSrv. Es entspricht weitgehend der vorgeschlagenen Nutzung von Timer 1. Ein zweiter Motor ließe sich z.B. ebenfalls im Hintergrund und unabhängig vom bereits vorhandenen Motor und auch unabhängig vom Hauptprogramm des Sketches durch Timer 3 steuern. Mit zwei Schrittmotoren ist so recht elegant z.B. ein sogenannter Plotter zu realisieren wie in Abschnitt 7.5 gezeigt.

6.5 Servomotoransteuerung

Schwierigkeitsgrad: ★★★★☆

Neben den normalen Gleichspannungsmotoren und den Schrittmotoren aus Abschnitt 6.4 gibt es eine dritte vor allem im Modellbau verbreitete Art von Motoren, die sogenannten Servos. fischertechnik vertreibt einen Servo unter der Artikelnummer 132292³.

Technisch bestehen Servos aus einfachen Gleichstrommotoren und einer einfachen Elektronik. Eine Messmechanik meldet dieser Elektronik ständig den aktuellen Stellwert (Winkel) des Servos. Die Elektronik vergleicht diesen mit einem externen Sollwert und regelt den Motor bei Bedarf nach. Das Servo folgt also mit seinem Drehwinkel einem externen Sollwert.

Servos haben daher ein drei-adriges Anschlusskabel. Zwei Adern werden zur Spannungsversorgung (rot = 6 Volt, braun = Masse) verwendet, die dritte Ader (orange) überträgt den Sollwert. Es lassen sich handelsübliche Servos verwenden, aber auch der fischertechnik-Servo 132292⁴ aus dem 540585⁵-PLUS Bluetooth Control Set. Auch der fischertechnik RC-Servo 30275⁶ von 1983 müsste auf diese Weise verwendbar sein. Das wurde jedoch bisher nicht überprüft.

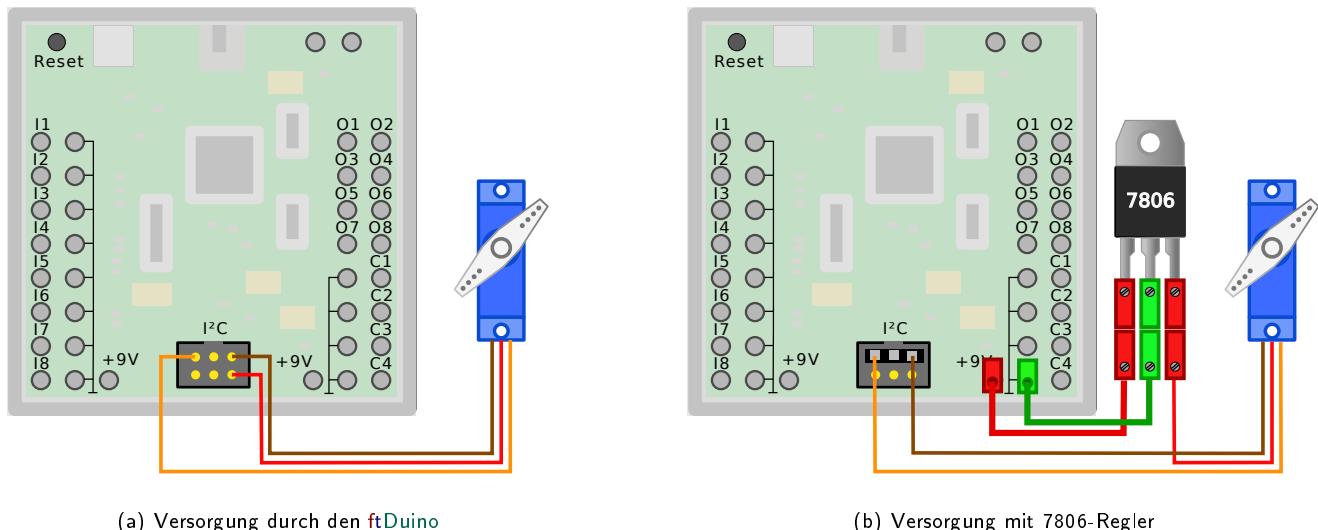


Abbildung 6.15: Anschluss des Servos an den ftDuino

Da Servos für eine Betriebsspannung von 6 Volt ausgelegt sind und oft auch bei 5 Volt noch funktionieren ist eine Versorgung aus den internen 5 Volt des ftDuino über den I²C-Anschluss möglich wie in Abbildung 6.15(a) dargestellt. Bei dieser Versorgung ist Vorsicht geboten, da die Stromaufnahme des Servos 100mA nicht überschreiten darf, um die interne Stromversorgung des ftDuino nicht zu überlasten. Die meisten Servos überschreiten diesen Wert deutlich und sollten daher nicht direkt aus dem ftDuino versorgt werden.

³fischertechnik-Datenbank: <https://ft-datenbank.de/tickets?fulltext=132292>

⁴fischertechnik-Datenbank: <https://ft-datenbank.de/tickets?fulltext=132292>

⁵fischertechnik-Datenbank: <https://ft-datenbank.de/tickets?fulltext=540585>

⁶fischertechnik-Datenbank: <https://ft-datenbank.de/tickets?fulltext=30275>

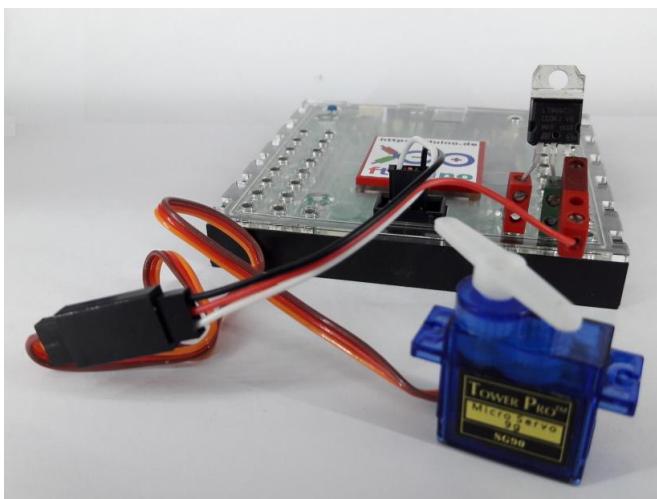
6.5.1 Externe 6-Volt-Versorgung

Wesentlich robuster und kaum aufwändiger ist die Versorgung über einen externen Spannungsregler z.B. vom Typ 7806, der unter dieser Bezeichnung leicht im Online-Handel zu finden ist. Dieser sogenannte Längsregler kann direkt an einen der 9-Volt-Ausgänge des [ftDuino](#) angeschlossen werden und stellt an seinem Ausgang eine auf 6 Volt reduzierte Spannung bereit.

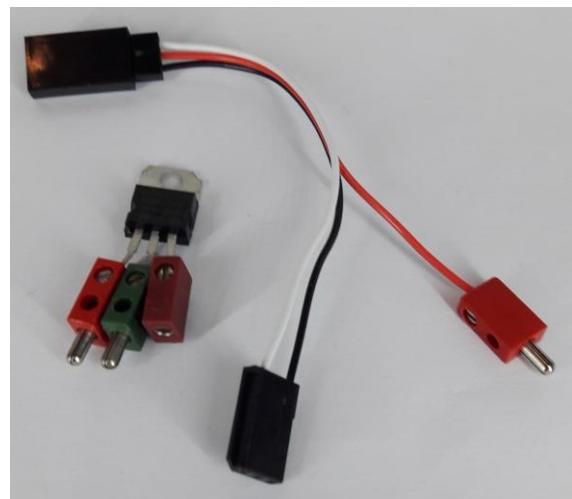
Benötigte Teile:

- 1x Spannungsregler 7806
- 1x Servo-Verlängerungskabel JR-Stecker
- 2x roter ft-Stecker
- 1x grüner ft-Stecker
- 1x rote ft-Buchse

Der 7806 kann mit fischertechnik-üblichen Steckern versehen und dann direkt in den [ftDuino](#) eingesteckt werden. Der Steuersignal-Anschluss muss mit dem SDA-Anschluss des I²C-Steckers verbunden werden. Die zusätzliche Nutzung des SCL-Anschlusses ermöglicht den Anschluss eines zweiten Servos. Trennt man das rote Kabel direkt am Stecker des Servos auf und versieht es mit einem fischertechnik-Stecker wie in Abbildung 6.15(b) dargestellt, so lässt sich der Stecker des Servos mit den zwei verbliebenen Adern direkt auf den I²C-Anschluss stecken. Will man das Anschlusskabel des Servos nicht zerschneiden, dann kann man auch ein handelsübliche JR-Servo-Verlängerungskabel zerschneiden wie in Abbildung 6.5.1 dargestellt. Der aufgetrennte mittlere rote Anschluss wird dann mit dem fischertechnik-Stecker an den ebenfalls mit fischertechnik-Hülsen versehenen 7806 gesteckt.



(a) Servo an Regler und Adapterkabel



(b) Spannungsregler und Adapterkabel

Abbildung 6.16: Servo-Motor am [ftDuino](#)

Das Steuersignal eines Servos entspricht nicht dem I²C-Standard. Stattdessen verwenden Servos ein einfaches Pulsweitenignal, das alle 20 Millisekunden wiederholt wird. Der Puls selbst ist zwischen einer und zwei Millisekunden lang und bestimmt den Winkel, den das Servo einnehmen soll. Eine Millisekunde steht dabei für den minimalen Wert und zwei Millisekunden für den maximalen. Soll der Servomotor in Mittelstellung fahren, so ist dementsprechend ein Puls von 1,5 Millisekunden Länge nötig.

Das Servo verfügt über keine weitere Intelligenz und es werden die vorgegebenen Steuersignale nicht überprüft. Pulslängen kleiner einer Millisekunde oder größer zwei Millisekunden versucht das Servo ebenfalls in entsprechende Winkel umzusetzen. Dabei ist zu beachten, dass der Bewegung des Servos mechanische Grenzen gesetzt sind und das Servo Schaden nehmen kann, wenn es Positionen außerhalb seines normalen Arbeitsbereichs anzufahren versucht. Es ist daher nicht ratsam, den Bereich von ein bis zwei Millisekunden zu verlassen.

Um das nötige Puls-Signal auf den eigentlich für I²C-Signale vorgesehenen Pins zu erzeugen muss auf Software zurückgegriffen werden. Ein Programmfragment, das den Servo in die Mittelposition bewegen könnte z.B. folgendermaßen aussehen:

```
1 void setup() {
2     // Port D.1 (SDA-Anschluss) auf Ausgang schalten
```

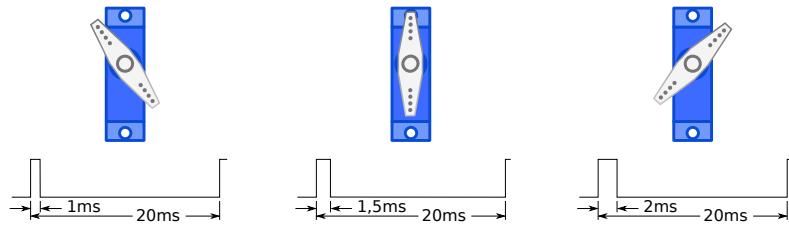


Abbildung 6.17: Servo-Winkel in Abhängigkeit vom Stellsignal

```

3   bitSet(DDRD, 1);
4 }
5
6 void loop() {
7   // Port D.1 auf High-Pegel (5V) legen
8   bitSet(PORTD, 1);
9
10 // 1500us (1.5ms) warten
11 _delay_us(1500);
12
13 // Port D.1 auf Low-Pegel (GND) legen
14 bitClear(PORTD, 1);
15
16 // 18500us (18.5ms) warten
17 _delay_us(20000-1500);
18 }
```

Hier wird der SDA-Anschluss am I²C zunächst in der `setup()`-Funktion zu einem unabhängig verwendbaren Ausgang konfiguriert. In der Folge kann in der `loop()`-Funktion der Ausgang auf Hi (5 Volt) oder Masse (GND) geschaltet werden, indem das entsprechende Bit im Register PORTD gesetzt oder gelöscht wird. Nach dem Einschalten des Ausgangs wird 1500 Mikrosekunden (1,5 Millisekunden) gewartet, nach dem Ausschalten 18,5 Millisekunden, so dass die Zykluszeit von insgesamt 20 Millisekunden erreicht wird.

Wie schon beim Schrittmotor ergibt sich das Problem, dass der Prozessor des ftDuino bei dieser einfachen Art der Programmierung permanent mit der Signalerzeugung ausgelastet wird und nebenbei keine anderen Aufgaben erledigen kann.

Die Lösung besteht wie beim Schrittmotor darin, die Signalerzeugung im Hintergrund durch einen Hardwaretimer zu veranlassen. Das Beispiel Datei > Beispiele > FtduinoSimple > ServoDemo bringt eine einfache Klasse zur Servoansteuerung mit. Das eigentliche Hauptprogramm sieht dann folgendermaßen aus:

```

1 //
2 // Servo.ino
3 //
4
5 #include "Servo.h"
6
7 void setup() {
8   servo.begin();
9 }
10
11 void loop() {
12   static uint8_t value = Servo::VALUE_MAX/2;
13
14   if(value < Servo::VALUE_MAX) value++;
15   else value = 0;
16   servo.set(value);
17
18   delay(10);
19 }
```

Die Ansteuerung des Servos beschränkt sich auf den Aufruf der `servo.begin()`-Funktion, die die nötigen Timer im Hintergrund einrichtet. Der Winkel des Servos kann dann mit der `servo.set()`-Funktion von 0 (minimaler Winkel) bis `Servo::VALUE_MAX` (maximaler Winkel) eingestellt werden. Die Mittelposition wird z.B. durch `servo.set(Servo::VALUE_MAX/2)` angefahren.

6.6 Die Eingänge des ftDuino

Schwierigkeitsgrad: ★★★★☆

Wer sich schon einmal mit einem Arduino beschäftigt hat weiß, dass man dort relativ frei bestimmen kann, welche Anschlüsse man als Ein- oder Ausgänge verwenden möchte, da sämtliche Pins am Mikrocontroller in der Richtung umgeschaltet werden können. Beim ftDuino konnte diese Fähigkeit nicht erhalten werden, da an den Eingängen zusätzliche Schutzschaltungen gegen Überspannung und Kurzschlüsse eingesetzt werden und die Signale ausgängen verstärkt werden, um fischertechnik-Lampen und -Motoren betreiben zu können.

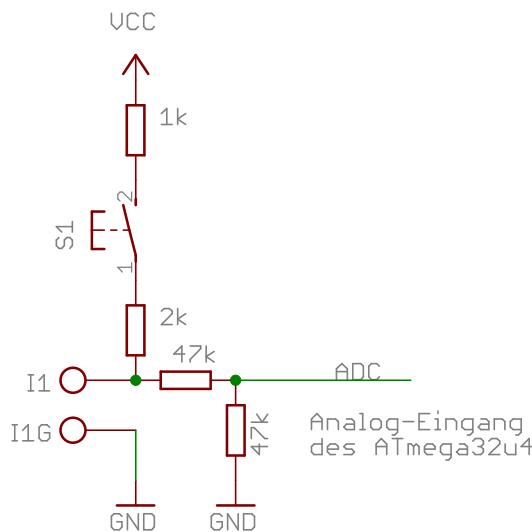


Abbildung 6.18: Interne Beschaltung der Eingänge I1 bis I8 des ftDuino

Jeder der acht Eingänge I1 bis I8 des ftDuino führt auf einen eigenen Analogeingang des ATmega32u4-Mikrocontrollers und kann von diesem unabhängig ausgewertet werden. Dazu kann der Mikrocontroller die Spannung des entsprechenden Eingangs messen.

6.6.1 Spannungsmessung

Bevor das Eingangssignal den Mikrocontroller erreicht wird es über einen Spannungsteiler aus zwei 47-Kilohm-Widerständen geführt. Diese Widerstände erfüllen zwei Aufgaben. Erstens halbieren sie die Spannung eines angelegten Signals bevor es den Mikrocontroller erreicht. Da der Mikrocontroller ftDuino-intern mit 5 Volt betrieben wird und auch nur Signale im Bereich von 0 bis 5 Volt verarbeiten kann. Die Spannungshalbierung erweitert den messbaren Eingangsspannungsbereich auf 0 bis 10 Volt, wodurch sich die fischertechnik-üblichen Spannungen bis maximal 9 Volt verarbeiten lassen. Zum zweiten schützen diese Widerstände im Zusammenspiel mit den Mikrocontroller-internen Schottdioden den Mikrocontroller vor Spannungen, die außerhalb des für ihn verträglichen 0 bis 5 Volt-Spannungsbereichs liegen. Spannungen bis zu 47 Volt an einem Eingang beschädigen den Mikrocontroller daher nicht.

6.6.2 Widerstandsmessung

Die $1\text{k}\Omega$ - und $2.2\text{k}\Omega$ -Widerstände sowie der Schalter haben keine Bedeutung, solange der Schalter offen ist. Acht dieser Schalter, je einer für jeden Eingang, befinden sich im ftDuino im Baustein mit der Bezeichnung CD4051 (IC1) wie im Schaltplan in Anhang A ersichtlich. Der Mikrocontroller kann genau einen der acht Schalter zu jeder Zeit schließen und auf diese Weise einen Widerstand von insgesamt $3.2\text{k}\Omega$ ($1\text{k}\Omega$ plus $2.2\text{k}\Omega$) vom jeweiligen Eingang gegen 5 Volt aktivieren.

Der Schalter wird geschlossen und die Widerstände werden aktiviert, wenn eine Widerstandsmessung erfolgen soll. Der $3.2\text{k}\Omega$ -Widerstand bildet dann mit einem zwischen Eingang und Masse angeschlossenen externen Widerstand einen Spannungsteiler. Aus der gemessenen Spannung kann dann der unbekannte externe Widerstand bestimmt werden.

Die Widerstandsmessung wird von der Ftdduino-Bibliothek im Hintergrund ausgeführt. Dabei findet auch eine automatische Umschaltung der Widerstandsmessung auf all jene Eingänge statt, die im Sketch zur Zeit zur Widerstandsmessung genutzt werden. Der Programmierer muss sich also um keine Details kümmern und kann jederzeit Widerstandswerte mit Hilfe der Funktion `ftdduino.input_get()` (siehe 9.2.2) abfragen.

6.6.3 Ein Eingang als Ausgang

Die Tatsache, dass im Falle einer Widerstandsmessung ein Widerstand gegen 5 Volt geschaltet wird bedeutet, dass über den zu messenden extern angeschlossenen Widerstand ein Stromkreis geschlossen wird. Der Strom durch diesen Stromkreis ist relativ gering. Wenn der Eingang direkt mit Masse verbunden ist beträgt der Gesamtwiderstand $3.2\text{ k}\Omega$ und es fließt ein Strom von $I = 5V/3.2\text{ k}\Omega = 1,5625mA$.

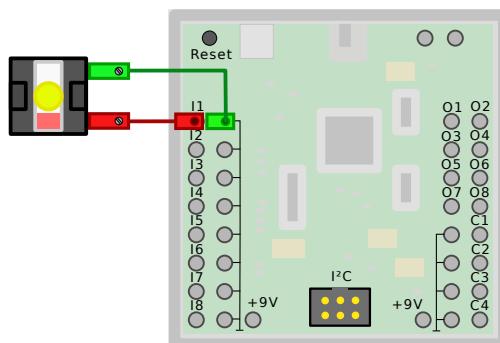


Abbildung 6.19: Anschluss einer LED an Eingang I1 des ftDuino

Dieser Strom reicht zwar nicht, um eine Lampe oder gar einen Motor zu betreiben. Aber eine Leuchtdiode kann man damit schwach zum Leuchten bringen. Schließt man eine Leuchtdiode direkt zwischen einem Eingang und Masse an und schaltet den Eingang auf Widerstandsmessung, so wird die LED ganz leicht leuchten.

Der tatsächliche Strom wird noch deutlich unter den vorausgesagten $1,5mA$ liegen, da zum einen direkt an der Leuchtdiode die sogenannte Vorwärtsspannung von circa $0,7V$ abfällt und über den Widerständen daher nur eine Spannung von etwas über vier Volt anliegt.

Zum anderen fragt die Ftdduino-Bibliothek im Hintergrund alle acht Eingänge ab und aktiviert jeden Eingang dabei nur $1/8$ der Zeit. Es fließt im Mittel daher auch nur $1/8$ des Stroms.

Die FtdduinoSimple-Bibliothek schaltet ebenfalls die Widerstände ein und zwar für den jeweils zuletzt aktivierten Eingang. Dieser Widerstand ist dann dauerhaft aktiviert, bis ein anderer Eingang angefragt wird. Das folgenden Code-Fragment lässt eine LED an Eingang I1 im Sekundentakt blinken.

```

1 #include <FtdduinoSimple.h>
2
3 void loop() {
4     // liest Wert von Eingang I1, aktiviert Widerstand auf I1
5     ftdduino.input_get(Ftdduino::I1);
6     delay(1000);
7     // liest Wert von Eingang I2, deaktiviert Widerstand auf I1
8     // (und aktiviert ihn auf I2)
9     ftdduino.input_get(Ftdduino::I2);
10    delay(1000);
11 }
```

6.7 Temperaturmessung

Schwierigkeitsgrad: ★★★★☆

Fischertechnik vertreibt unter der Artikelnummer 36437⁷ einen sogenannten NTC. Dieses unscheinbare Bauteil liegt einigen Robotics-Baukästen bei.

Ein NTC ist ein elektrischer Widerstand, der seinen Wert abhängig von der Umgebungstemperatur ändert. Er eignet sich daher zur Temperaturmessung. NTC steht dabei für "Negativer-Temperatur-Coeffizient", was bedeutet, dass der ohmsche Widerstand mit steigender Temperatur sinkt. NTCs werden im Deutschen auch als Heißleiter bezeichnet, da ihre Leitfähigkeit mit der Temperatur steigt.

Der Nennwiderstand R_N eines NTCs wird in der Regel bei einer Temperatur von 25 °C (298,15 K) angegeben. Der für den fischertechnik-Sensor angegebene Wert ist 1.5 kΩ. Der ohmsche Widerstand beträgt bei 25 °C also 1.5 kΩ.

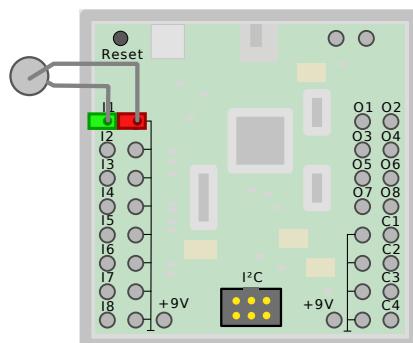


Abbildung 6.20: Anschluss des Temperatursensors an Eingang I1

6.7.1 Sketch Temperature

Der folgende Sketch findet sich bei installierter **ftDuino**-Unterstützung im Menü der Arduino-IDE unter **Datei > Beispiele > Ftduino > Temperature**.

```
1 //  
2 // Temperaure.ino  
3 //  
4 // Abfrage eines fischertechnik Temperatur-Widerstands an Eingang II  
5 //  
6 // (c) 2018 by Till Harbaum <till@harbaum.org>  
7 //  
8 //  
9 #include <Ftduino.h>  
10 #include <math.h>           // Für Fliesspunkt-Arithmetik  
11 //  
12 #define K2C 273.15          // Offset Kelvin nach Grad Celsius  
13 #define B 3900.0             // sog. B-Wert des Sensors  
14 #define R_N 1500.0            // Widerstand bei 25 Grad Celsius Referenztemperatur  
15 #define T_N (K2C + 25.0)      // Referenztemperatur in Kelvin  
16 //  
17 float r2deg(uint16_t r) {  
18     if(r == 0) return NAN;    // ein Widerstand von 0 Ohm ergibt keine sinnvolle Temperatur  
19 //  
20     // Widerstand in Kelvin umrechnen  
21     float t = T_N * B / (B + T_N * log(r / R_N));  
22 //  
23     // Kelvin in Grad Celsius umrechnen  
24     return t - K2C;  
25 //  
26     // alternativ: Kelvin in Grad Fahrenheit umrechnen  
27 //     return t * 9 / 5 - 459.67;  
28 }  
29 //  
30 void setup() {  
31     // LED initialisieren  
32     pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
```

⁷fischertechnik-Datenbank: <https://ft-datenbank.de/tickets?fulltext=36437>

```

33   digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
34
35   Serial.begin(115200);
36   while(!Serial);
37
38   ftduino.init();
39
40   // Die Temperaturmessung erfolgt mit einem
41   ftduino.input_set_mode(Ftduino::I1, Ftduino::RESISTANCE);
42 }
43
44 void loop() {
45   uint16_t r = ftduino.input_get(Ftduino::I1);
46
47   Serial.print("I1: ");
48   Serial.print(r2deg(r));
49   Serial.println(" Grad Celsius");
50
51   delay(1000);
52 }
```

Sketchbeschreibung

Der Temperatur-Sketch verwendet an einigen Stellen sogenannte Fließkommazahlen, um Temperaturen zu speichern. So wird die in der Computertechnik verwendete interne Darstellung von nicht-ganzzahligen Werten (Dezimalbrüchen) genannt. Der Sketch bindet dafür in Zeile 10 die Datei `math.h` ein, um dem Sketch Zugriff auf Fließkommafunktionen zu geben. Zur Speicherung der Fließkommazahlen wird der Datentyp `float` z.B. in Zeile 21 verwendet.

Da der zur Temperaturmessung verwendete Sensor ein Widerstand ist wird in der `setup()`-Funktion in Zeile 41 der Eingang `I1` des `ftDuino` auf Widerstandsmessung eingestellt.

Der eigentlich Widerstandswert wird in Zeile 45 von Eingang `I1` ausgelesen und in der ganzzahligen Variablen `r` abgelegt. Während der Ausgabe des Wertes in Zeile 48 wird die Funktion `r2deg()` aufgerufen. Diese Funktion befindet sich in den Zeilen 17 bis 28. Sie nimmt einen ganzzahligen Widerstandswert in Ohm entgegen und liefert eine Temperatur in Grad Celsius als Fließkommawert zurück.

Zunächst erfolgt in Zeile 21 die Umrechnung des Widerstands in Kelvin. Dazu wird neben dem Widerstand R_N bei 25 °C auch der sogenannte B -Wert des Sensors benötigt. Dieser Wert beschreibt das Verhalten des Sensors außerhalb des 25 °C-Punkts und wie stark dabei der Widerstand auf Temperaturänderungen reagiert. Dieser Wert liegt bei dem von fischertechnik vertriebenen Sensor bei 3900.

Für NTCs gilt näherungsweise⁸:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_N} + \frac{1}{B} \ln\left(\frac{R_T}{R_N}\right) \Leftrightarrow T = \frac{T_N * B}{B + T_N * \ln\left(\frac{R_T}{R_N}\right)}$$

mit

- T ... aktuelle Temperatur
- T_N ... Nenntemperatur (üblicherweise 25 °C)
- B ... B-Wert
- R_T ... Widerstand bei aktueller Temperatur
- R_N ... Widerstand bei Nenntemperatur

Nach der Umrechnung liegt die Temperatur in Kelvin vor. Zur Umrechnung in Grad Celsius muss Zeile 24 lediglich eine Konstante abgezogen werden. Eine Umrechnung in Grad Fahrenheit wäre etwas komplexer und ist beispielhaft in Zeile 27 dargestellt.

Die Genauigkeit der Temperaturmessung ist direkt von der Genauigkeit der Widerstandsmessung abhängig und diese ist wie in Abschnitt 1.2.5 erklärt von der Spannungsversorgung abhängig. Zur Temperaturmessung sollte der `ftDuino` daher aus einer 9v-Quelle mit Spannung versorgt werden. Eine Versorgung nur über die USB-Schnittstelle ist nicht ausreichend.

⁸<https://de.wikipedia.org/wiki/Heißleiter>

6.8 Ausgänge an, aus oder nichts davon?

Schwierigkeitsgrad: ★★★★

Einen Ausgang kann man ein- oder ausschalten, das ist die gängige Sichtweise. Dass es aber noch einen weiteren Zustand gibt ist auf den ersten Blick vielleicht nicht offensichtlich.

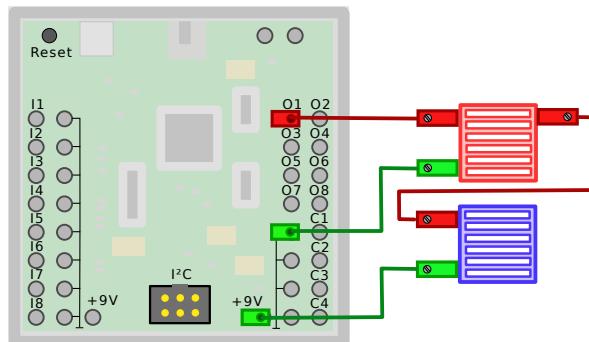


Abbildung 6.21: Zwei Lampen an Ausgang 01

Die Ausgänge des `ftDuino` lassen sich in drei Zustände schalten: `Ftduino::HI`, `Ftduino::LO` und `Ftduino::OFF`.

Am offensichtlichsten ist der Zustand `Ftduino::HI`. In diesem Zustand wird der entsprechende Ausgang `ftDuino`-intern mit der 9-Volt-Versorgungsspannung verbunden. Ist an diesem Ausgang eine Lampe oder ein Motor so angeschlossen, dass der zweite Anschluss an Masse liegt, so fließt ein Strom von der 9V-Quelle über den Ausgang durch Lampe oder Motor zur Masse. Der Motor dreht sich und die Lampe leuchtet. Im abgebildeten Beispiel leuchtet die rote Lampe.

Im Zustand `Ftduino::LO` ist der entsprechende Ausgang mit Masse verbunden. Eine wieder mit dem zweiten Anschluss an Masse angeschlossene Lampe wird nun nicht mehr leuchten, da beide Anschlüsse der Lampe auf Masse liegen und die Spannung zwischen beiden Anschlüssen daher 0 Volt beträgt. Schließt man den zweiten Anschluss der Lampe aber an 9 Volt an, so leuchtet sie nun. Der Strom fließt von der Spannungsversorgung des `ftDuino` über den 9-V-Anschluss, durch die Lampe und schließlich über den auf Masse liegenden Ausgang. Im abgebildeten Beispiel leuchtet nun die blaue Lampe.

Der dritte Zustand ist schließlich der Zustand `Ftduino::OFF`. In diesem Fall ist der Ausgang komplett offen. Er ist weder mit Masse noch mit 9 Volt verbunden und es fließt kein Strom über ihn. Als Resultat leuchten beiden Lampen mit halber Helligkeit, da der Strom nun vom Ausgang völlig unbeeinflusst durch beide Lampen fließt. Dieser Zustand wird oft auch mit dem englischen Begriff "tristate" bezeichnet und entsprechende Ausgänge an Halbleitern als "tristate-fähig". Im Deutschen beschreibt der Begriff "hochohmig" diesen dritten Zustand recht gut.

Der folgende Sketch wechselt im Sekundentakt zwischen den drei Zuständen. Man kann diesen Effekt zum Beispiel ausnutzen, um zwei Motoren oder Lampen an einem Ausgang unabhängig zu steuern, um Ausgänge zu sparen. Allerdings lassen sich bei dieser Verschaltung niemals beide Lampen gleichzeitig ausschalten

6.8.1 Sketch OnOffTristate

```

1  /*
2   * OnOffTristate - der dritte Zustand
3   */
4
5 #include <FtduinoSimple.h>
6
7 void setup() { }
8
9 // Die Loop-Funktion wird endlos immer und immer wieder ausgeführt
10 void loop() {
11     // Ausgang 01 auf 9V schalten
12     ftduino.output_set(Ftduino::01, Ftduino::HI);
13     delay(1000);
14     // Ausgang 01 auf Masse schalten
15     ftduino.output_set(Ftduino::01, Ftduino::LO);

```

```

16     delay(1000);
17     // Ausgang 01 unbeschaltet lassen
18     ftduino.output_set(Ftduino::01, Ftduino::OFF);
19     delay(1000);
20 }
```

6.8.2 Leckströme

Ganz korrekt ist die Aussage, dass im hochohmigen bzw. Tristate-Zustand kein Strom fließt nicht. Über die Leistungsstufen und deren interne Schutzschaltungen fließt oft trotzdem ein geringer Strom. In einigen Fällen wird dies sogar bewusst getan, um z.B. mit Hilfe dieses geringen Stromflusses das Vorhandensein eines angeschlossenen Verbrauchers feststellen zu können. Diese sogenannten Leckströme wurden in Abschnitt 6.1.1 bereits beobachtet.

Ersetzt man die zwei Lampen im aktuellen Modell durch zwei Leuchtdioden, so wird man feststellen, dass die vom Ausgang nach Masse angeschlossene LED immer dann leicht glimmt, wenn der entsprechende Ausgang hochohmig geschaltet ist. Nur wenn der Ausgang auf Masse geschaltet ist leuchtet die LED nicht. Man kann also direkt an der LED die drei Zustände unterscheiden.

6.9 Aktive Motorbremse

Schwierigkeitsgrad: ★★☆☆☆

Das Abschalten eines Motors scheint rein elektrisch trivial zu sein. Sobald der Motor von der Spannungsversorgung getrennt wird bleibt er stehen. Im Wesentlichen stimmt das auch so.

Physikalisch bedeutet die Trennung von der Spannungsversorgung lediglich, dass dem Motor keine weitere Energie zugeführt wird. Dass das letztlich dazu führt, dass der Motor anhält liegt daran, dass die in der Rotation des Motors gespeicherte Energie langsam durch Reibung z.B. in den Lagern der Motorwelle verloren geht. Wie lange es dauert, bis der Motor auf diese Weise zum Stillstand kommt hängt wesentlich vom Aufbau des Motors und der Qualität seiner Lager ab.

Zusätzlich wirken viele Gleichstrom-Elektromotoren, wie sie auch fischertechnik einsetzt, als Generator. Werden sie gedreht, so wird in ihren internen Elektromagneten eine Spannung induziert.

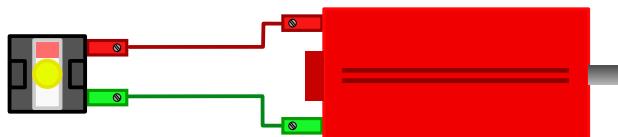


Abbildung 6.22: Der TXT-Encoder-Motor als Generator

Dieser Effekt lässt sich mit einer Leuchtdiode leicht nachvollziehen. Schließt man die Leuchtdiode direkt an den Motor an und dreht dann manuell die Motorachse, so leuchtet die Leuchtdiode auf, wenn man den Motor in die richtige Richtung dreht und damit eine Spannung mit der für die Leuchtdiode passenden Polarität erzeugt. Man kann für diesen Versuch auch eine Glühlampe oder gar einen zweiten Motor nehmen. Deren gegenüber einer Leuchtdiode höhere Energieaufnahme erfordert aber gegebenenfalls ein etwas kräftigeres Drehen.

Je mehr Last ein Generator versorgen soll und je mehr Energie im entnommen werden soll, desto größer ist die mechanische Kraft, die nötig ist, um den Generator zu drehen. Höhere Last bedeutet in diesem Fall ein geringerer elektrischer Widerstand. Die Leuchtdiode mit ihrer vergleichsweise geringen Last besitzt einen hohen elektrischen Widerstand, die Glühlampe und noch mehr der Motor besitzen einen geringen elektrischen Widerstand und belasten bzw. bremsen den Generator damit stärker. Die größte denkbare Last ist in diesem Fall der Kurzschluss. Er hat einen minimalen elektrischen Widerstand und sorgt für maximalen Stromfluss und damit maximale elektrische Last am Generator. Auch die Bremswirkung ist dabei maximal.

Dieser Effekt lässt sich nutzen, um einen Elektromotor zu bremsen. Wende beide Anschlüsse eines Motors miteinander verbunden, so fließt ein Strom, der eine Bremswirkung entwickelt. Das wurde bereits beim Not-Aus-Modell aus Abschnitt 6.2 genutzt, um den Motor im Notfall schnell zu stoppen. Ist dagegen z.B. einer der Anschlüsse des Motors offen, so ist

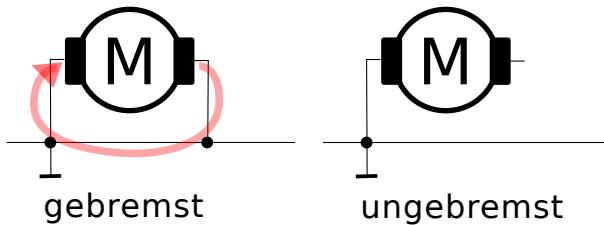


Abbildung 6.23: Elektrisch gebremster und ungebremster Elektromotor

kein geschlossener Stromkreis vorhanden und es fließt kein Strom und es tritt keine Bremswirkung auf. Wie groß ist dieser Effekt aber?

Der fischertechnik-Encoder-Motor enthält eine Möglichkeit zur Drehzahlmessung wie schon im PWM-Experiment in Abschnitt 6.3 genutzt. Das Bremsverhalten dieses Motors lässt sich daher experimentell gut verfolgen.

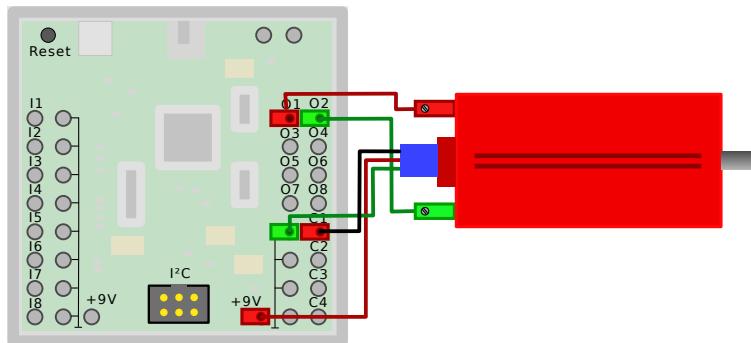


Abbildung 6.24: Anschluss des TXT-Encoder-Motors an die Anschlüsse M1 und C1

Das Beispiel `Datei > Beispiele > Ftduino > MotorBrake` lässt den Motor an Ausgang M1 alle fünf Sekunden für drei Umdrehungen laufen und misst dann für eine weitere Sekunde, wie viele weitere Impulse der Encoder an Eingang C1 liefert, nachdem er die drei Umdrehungen vollendet hat und abgeschaltet wurde.

Die Funktion `motor_counter_set_brake()` (siehe Abschnitt 9.2.9) wird dabei im Wechsel so aufgerufen, dass der Motor frei ausläuft bzw. dass er aktiv gebremst wird.

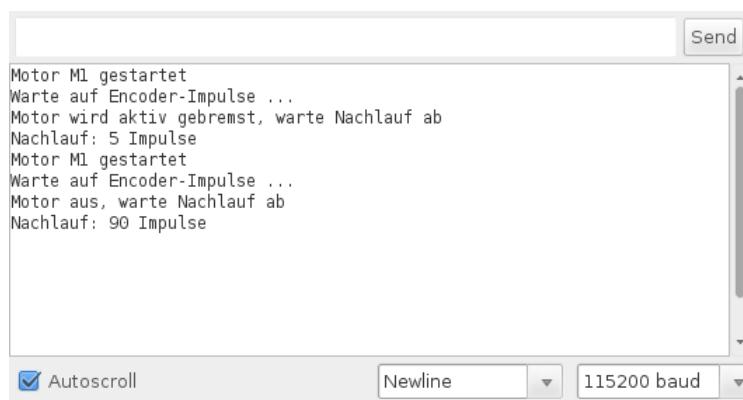


Abbildung 6.25: Ausgabe bei Verwendung des TXT-Encoder-Motors

Wie in Abbildung 6.25 zu sehen macht die aktive Bremse einen deutlichen Unterschied. Während der Encoder-Motor ungebremst noch für weitere 90 Impulse weiter dreht, also fast 1,5 volle Umdrehungen, kommt er bei aktiver Bremse bereits nach fünf weiteren Impulse zum Stillstand. Das entspricht lediglich knapp $1/13$ Umdrehung.

6.10 USB-Tastatur

Schwierigkeitsgrad: ★★★★☆

Der **ftDuino** ist nicht vom klassischen Arduino Uno abgeleitet, sondern vom Arduino Leonardo. Der wesentliche technische Unterschied zwischen beiden Arduinos liegt in der Tatsache, dass der Arduino Uno einen separaten Chip für die USB-Kommunikation mit dem PC verwendet, während diese Aufgabe beim Arduino Leonardo allein dem ATmega32u4-Mikrocontroller zufällt.

In den meisten Fällen macht das keinen Unterschied und die meisten Sketches laufen auf beiden Arduinos gleichermaßen. Es gibt allerdings sehr große Unterschiede in den Möglichkeiten, die sich mit beiden Arduinos bei der USB-Anbindung bieten. Während der USB-Chip im Uno auf das Anlegen eines COM-Ports beschränkt ist zeigt sich der Leonardo und damit auch der **ftDuino** sehr viel flexibler und der **ftDuino** kann sich unter anderem gegenüber einem PC als USB-Tastatur ausgeben.

Da die Ausgänge des **ftDuino** bei diesem Modell nicht verwendet werden reicht die Stromversorgung über USB und es ist keine weitere Versorgung über Batterie oder Netzteil nötig.

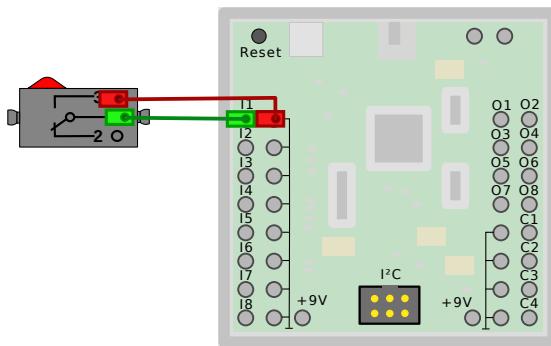


Abbildung 6.26: Tastatur-Nachricht

6.10.1 Sketch USB/KeyboardMessage

```

1  /*
2   * KeyboardMessage - USB-Tastatur
3
4   * Der ftDuino gibt sich als USB-Tastatur aus und "tippt" eine Nachricht, sobald
5   * ein Taster an Eingang I1 für mindestens 10 Millisekunden gedrückt wird.
6
7   * Basierend auf dem Sketch:
8   * http://www.arduino.cc/en/Tutorial/KeyboardMessage
9
10  Dieser Beispielcode ist Public-Domain.
11 */
12
13 #include <FtduinoSimple.h>
14 #include <Keyboard.h>
15
16 unsigned long lastButtonEvent = 0;
17 uint16_t previousButtonState = Ftduino::OFF;      // for checking the state of a pushButton
18
19 void setup() {
20     // initialize control over the keyboard:
21     Keyboard.begin();
22 }
23
24 void loop() {
25     // Taste an Eingang I1 auslesen
26     uint16_t buttonState = ftduino.input_get(Ftduino::I1);
27
28     // Hat sich der Zustand der Taste geändert?
29     if(buttonState != previousButtonState) {
30         // ja, Zeit des Wechsels merken

```

```

31     lastButtonEvent = millis();
32     // und den neuen Zustand merken, damit wir weitere
33     // Änderungen erkennen können
34     previousButtonState = buttonState;
35 }
36
37 // Gibt es ein unbearbeitetes Ereignis und hat sich der Zustand der Taste seitdem
38 // für mehr als 10 Millisekunden nicht geändert?
39 if(lastButtonEvent && ((millis() - lastButtonEvent) > 10)) {
40     // Zeit dieses Ereignisses vergessen
41     lastButtonEvent = 0;
42
43     // Taste wurde gedrückt
44     if(buttonState) {
45         // Nachricht "tippen"
46         Keyboard.println("Hallo vom ftDuino!");
47     }
48 }
49 }
```

Sketchbeschreibung

Die Arduino-IDE bringt bereits Bibliotheken mit, um USB-Geräte wie Mäuse und Tastaturen umzusetzen. Der eigentliche Sketch bleibt so sehr einfach und die komplizierten USB-Detail bleiben in den Bibliotheken verborgen. Entsprechend kurz ist auch dieser Sketch.

In der `setup()`-Funktion muss lediglich die Methode `Keyboard.begin()` aufgerufen werden, um beim Start des `ftDuino` alle USB-seitigen Voreinstellungen zu treffen, so dass der `ftDuino` vom PC als USB-Tastatur erkannt wird. Allerdings verfügt diese Tastatur zunächst über keine Tasten, so dass man kaum merkt, dass der PC nun über eine zusätzliche Tastatur zu verfügen meint.

Um die Tastatur mit Leben zu füllen muss in der `loop()`-Funktion bei Bedarf ein entsprechendes Tastensignal erzeugt und an den PC gesendet werden. In den Zeilen 25 bis 35 des Sketches wird ein Taster an Eingang I1 abgefragt und sichergestellt, dass nur Tastendrücke über 10ms Länge als solche erkannt werden (mehr Details zu diesem sogenannten Entprellen findet sich in Abschnitt 6.12).

Immer wenn die Taste an I1 gedrückt wurde, werden die Sketchzeilen 45 und folgende ausgeführt. Hier wird die Funktion `Keyboard.println()` aus der Arduino-Keyboard-Bibliothek aufgerufen und ein Text an den PC gesendet. Für den PC sieht es so aus, als würde der Text vom Anwender auf der Tastatur getippt⁹.

Die Möglichkeit, Nachrichten direkt als Tastatureingaben zu senden kann sehr praktisch sein, erlaubt sie doch ohne weitere Programmierung auf dem PC, die automatische Eingabe z.B. vom Messwerten in eine Tabelle oder ähnlich. Natürlich lässt sich diese Fähigkeit aber auch für allerlei Schabernack nutzen, indem der `ftDuino` zeitgesteuert oder auf andere Ereignisse reagierend den überraschten Anwender mit unerwarteten Texteingaben irritiert. Bei solchen Späßen sollte man immer eine ordentliche Portion Vorsicht walten lassen, da der falsche Tastendruck zur falschen Zeit leicht einen Datenverlust zur Folge haben kann.

6.11 USB-GamePad

Schwierigkeitsgrad: ★★★★☆

Aus der PC-Sicht ist der Unterschied zwischen einer USB-Tastatur und einem USB-Joystick oder -Gamepad minimal. Beide nutzen das sogenannte USB-HID-Protokoll (HID = Human Interface Device, also ein Schnittstellengerät für Menschen). Arduino-seitig gibt es aber den fundamentalen Unterschied, dass die Arduino-Umgebung zwar vorgefertigte Bibliotheksfunctionen für Tastaturen mitbringt, für Gamepads und Joysticks aber nicht. Um trotzdem ein USB-Gamepad zu implementieren ist daher im Sketch sehr viel Aufwand zu treiben.

⁹Weitere Informationen und tiefergehenden Erklärungen zu den Arduino-Bibliotheken zur Maus- und Tastaturnachbildung finden sich unter <https://www.arduino.cc/en/Reference/MouseKeyboard>

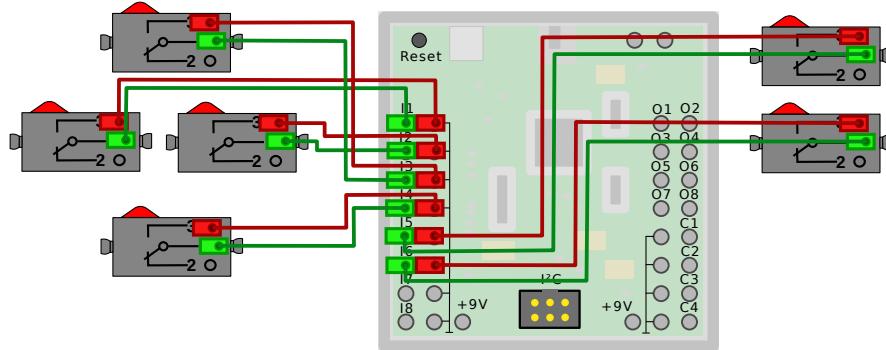


Abbildung 6.27: GamePad mit vier Richtungstasten und zwei Feuerknöpfen

6.11.1 Sketch USB/GamePad

Das entsprechende Beispiel findet sich unter Datei > Beispiele > FtduinoSimple > USB > GamePad. Dieser Sketch besteht aus drei Dateien. Während GamePad.ino den eigentlichen Sketch enthält implementieren HidGamePad.cpp und HidGamePad.h denjenigen Teil der Gamepad-Unterstützung, die die Arduino-IDE nicht bietet. Interessant ist vor allem die _hidReportDescriptor-Struktur in der Datei HidGamePad.cpp.

```

9 static const uint8_t _hidReportDescriptor[] PROGMEM = {
10 0x05, 0x01, // USAGE_PAGE (Generic Desktop)
11 0x09, 0x05, // USAGE (Gamepad)
12 0x85, REPORT_ID, // REPORT_ID(3)
13 0xa1, 0x01, // COLLECTION (Application)
14 0x09, 0x01, // USAGE (Pointer)
15 0xa1, 0x00, // COLLECTION (Physical)
16 0x09, 0x30, // USAGE (X)
17 0x09, 0x31, // USAGE (Y)
18 0x15, 0x00, // LOGICAL_MINIMUM(0)
19 0x26, 0xff, 0x00, // LOGICAL_MAXIMUM(255)
20 0x35, 0x00, // PHYSICAL_MINIMUM(0)
21 0x46, 0xff, 0x00, // PHYSICAL_MAXIMUM(255)
22 0x75, 0x08, // REPORT_SIZE(8)
23 0x95, 0x02, // REPORT_COUNT(2)
24 0x81, 0x02, // INPUT (Data,Var,Abs)
25 0xc0, // END_COLLECTION
26 0x05, 0x09, // USAGE_PAGE (Button)
27 0x19, 0x01, // USAGE_MINIMUM (Button 1)
28 0x29, 0x02, // USAGE_MAXIMUM (Button 2)
29 0x15, 0x00, // LOGICAL_MINIMUM(0)
30 0x25, 0x01, // LOGICAL_MAXIMUM(1)
31 0x95, 0x02, // REPORT_COUNT(2)
32 0x75, 0x01, // REPORT_SIZE(1)
33 0x81, 0x02, // INPUT (Data,Var,Abs)
34 0x95, 0x06, // REPORT_COUNT(6)
35 0x81, 0x03, // INPUT (Const,Var,Abs)
36 0xc0 // END_COLLECTION
37 };

```

Diese vergleichsweise kryptische Struktur beschreibt die Fähigkeiten eines USB-HID-Geräts¹⁰. Sie beschreibt, um welche Art Gerät es sich handelt und im Falle eines Joysticks über was für Achsen und Tasten er verfügt.

In diesem Fall meldet das Gerät, dass es über zwei Achsen X und Y verfügt, die jede einen Wertebereich von 0 bis 255 abdecken. Weiterhin gibt es zwei Buttons, die jeweils nur den Zustand an und aus kennen. Für einen einfachen Joystick reicht diese Beschreibung. Es ist aber leicht möglich, die Beschreibung zu erweitern und zusätzliche Achsen und Tasten vorzusehen. Mit den insgesamt acht analogen und den vier digitalen Eingängen verfügt der ftDuino über ausreichend Verbindungsmöglichkeiten für komplexe Eingabegeräte.

Übliche HID-Geräte sind Tastaturen, Mäuse und Joysticks bzw. Gamepads. Aber die Spezifikation der sogenannten HID-

¹⁰ Mehr Info unter <http://www.usb.org/developers/hidpage/>

Usage-Tabellen¹¹ sieht wesentlich originellere Eingabegeräte für diverse Sport-, VR-, Simulations- und Medizingeräte und vieles mehr vor. Und natürlich ist mit den Ausgängen des ftDuino auch die Implementierung von Rückmeldungen über Lampen oder Motoren in Form von z.B. Force-Feedback möglich.

6.12 Entprellen

Schwierigkeitsgrad: ★★★★☆

In einigen der vorherigen Sketches wurde unerwartet viel Aufwand betrieben, um Taster abzufragen. Im Pwm-Sketch aus Abschnitt 6.3.1 wurde in den Zeilen 35 und 51 eine Verzögerung von einer Millisekunde eingebaut und im KeyboardMessage-Sketch in Abschnitt 6.10 wurde in den Zeilen 31 und 39-41 ebenfalls die Zeit erfasst und in die Auswertung des Tastendrucks eingefügt. Die Frage, warum das nötig ist soll etwas näher betrachtet werden.

Der Grund für diese Verwendung von Zeiten bei der Auswertung von einzelnen Tastendräcken ist das sogenannte "Prellen". Mechanische Taster bestehen aus zwei Metallkontakte, die entweder getrennt sind oder sich berühren. In Ruhe sind die Kontakte getrennt und wenn der Taster betätigt wird, dann sorgt eine Mechanik dafür, dass die beiden Metallkontakte in Berührung kommen und der Kontakt geschlossen wird.

Folgender Sketch fragt kontinuierlich einen Taster an Eingang I1 ab und gibt auf dem COM:-Port eine Meldung aus, wenn sich der Zustand ändert. Zusätzlich zählt er mit, wie oft sich der Zustand insgesamt bereits geändert hat.

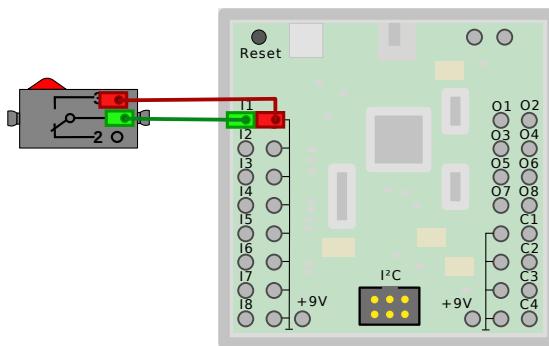


Abbildung 6.28: Entprellen

6.12.1 Sketch Debounce

```

1  /*
2   * Debounce
3
4   * Demonstriert Tastenprellen
5  */
6
7 #include <FtduinoSimple.h>
8
9 // die setup-Funktion wird einmal beim Start aufgerufen
10 void setup() {
11   Serial.begin(9600);
12
13   while(!Serial); // warte auf USB-Verbindung
14
15   Serial.println("ftDuino Tastenprell-Beispiel");
16 }
17
18 uint8_t letzter_zustand = false;
19 uint8_t wechselzaehler = 0;
20
21 // die loop-Funktion wird immer wieder aufgerufen

```

¹¹http://www.usb.org/developers/hidpage/Hut1_12v2.pdf

```

22 void loop() {
23   uint8_t zustand = ftduino.input_get(Ftduino::I1); // Taster auslesen
24
25   if(zustand != letzter_zustand) { // Hat der Zustand sich geändert?
26     wechselzaehler = wechselzaehler + 1; // Ja, Zähler rum eins erhöhen
27
28     Serial.print("I1 ");
29     Serial.print(wechselzaehler);
30     Serial.println(" mal geändert");
31     letzter_zustand = zustand; // neuen Zustand als letzten merken
32   }
33 }
```

Sketchbeschreibung

In den Zeilen 10 bis 16 wird wie schon beim ComPort-Beispiel aus Abschnitt 3.3 die Ausgabe an den PC vorbereitet und für den seriellen Monitor eine Nachricht ausgegeben.

In Zeile 23 wird kontinuierlich der Eingang I1 abgefragt. Hat sich sein Zustand gegenüber dem in der Variablen `letzter_zustand` gespeicherten geändert, so wird dies in Zeile 25 festgestellt. In der Folge wird die Variable `wechselzaehler` erhöht und der neue Wert in den Zeilen 28 bis 30 ausgegeben.

Aufgabe 1: Es zählt zu viel

Etwas merkwürdiges passiert, wenn man den Sketch auf den `ftDuino` lädt und ausprobiert: Sobald die Taste gedrückt wird erscheinen gleich mehrere Meldungen über Zustandsänderungen des Eingangs und auch der Zähler zählt wesentlich weiter als erwartet. Was passiert hier?

Das Problem ist, dass im Moment des Schaltens der Kontakt nicht sofort perfekt schließt. Stattdessen berühren sich die Metallflächen kurz, federn dann für ein paar Mikrosekunden zurück und öffnen sich wieder für einen sehr kurzen Moment. Erst nach mehreren Federvorgängen kommen die Kontakte zur Ruhe und sind dauerhaft geschlossen.

Lösung 1:

Die einfachste Lösung des Problems liegt darin, ein klein wenig zu warten, bevor man nach einem Schaltereignis ein weiteres akzeptiert. Das erreicht man zum Beispiel, indem man nach Zeile 31 zusätzlich etwas wartet, wie es auch im `Pwm-Sketch` aus Abschnitt 6.3.1 getan wurde.

```

31   letzter_zustand = zustand; // neuen Zustand als letzten merken
32   delay(10); // warte zehn Millisekunden
33 }
```

Nach dieser Änderung zählt der Sketch tatsächlich nur noch einzelne Tastendrücke. Diese einfache Lösung hat aber einen Nachteil: Die Ausführung des gesamten Sketches wird bei jedem Tastendruck für zehn Millisekunden pausiert. Hat der Sketch noch andere Aufgaben zu erledigen, dann wird die Verarbeitung dieser Aufgaben ebenfalls für diese zehn Millisekunden unterbrochen. Je nach verwendetem Taster lässt sich die Zeit auf unter eine Millisekunde verkürzen. Aber bei zu kurzer Wartezeit werden wieder falsche Ereignisse erkannt.

Eleganter ist es daher, bei jedem Ereignis mit der Funktion `millis()` einen Zeitstempel aus dem Systemzeitzähler zu nehmen und erst dann ein Ereignis als gültig zu erkennen, wenn das letzte Ereignis länger als 10 Millisekunden zurück liegt. Der `KeyboardMessage-Sketch` aus Abschnitt 6.10 löst das Problem auf genau diese Weise.

Aufgabe 2: Was passiert denn nun genau?

Wie lange der Taster prellt und wie er sich genau verhält konnte wir bisher nur vermuten. Lässt sich der `ftDuino` nutzen, um etwas genauer auf das Schaltverhalten des Tasters zu schauen?

Lösung 2:

Um Signalverläufe zu veranschaulichen verfügt die Arduino-IDE über ein sehr einfaches aber interessantes Werkzeug: Den sogenannten "seriellen Plotter" er findet sich im Menü unter **Werkzeuge > Serieller Plotter** und öffnet wie der serielle Monitor ein eigenes Fenster. Aber statt einen per COM:-Port empfangenen Text direkt anzuzeigen interpretiert der serielle Plotter die eingehenden Daten Zeile für Zeile als Werte, die grafisch in einer Kurve dargestellt (geplottet) werden.

Das folgende Beispiel ist unter **Datei > Beispiele > FtduinoSimple > BounceVisu** zu finden.

```

1  /*
2   *      BounceVisu
3   *
4   *      visualisiert Tastenprellen
5   */
6
7 #include <FtduinoSimple.h>
8
9 #define EVENT_TIME 480      // 480us
10 uint8_t event[EVENT_TIME];
11
12 // die setup-Funktion wird einmal beim Start aufgerufen
13 void setup() {
14     Serial.begin(9600);
15     while(!Serial);        // warte auf USB-Verbindung
16 }
17
18 // die loop-Funktion wird immer wieder aufgerufen
19 void loop() {
20
21     // Warte bis Taster gedrückt
22     if(ftduino.input_get(Ftduino::I1)) {
23
24         // hole 480 Mikrosekunden lang im Mikrosekundentakt je einen Eingangswert
25         for(uint16_t i=0;i<EVENT_TIME;i++) {
26             event[i] = ftduino.input_get(Ftduino::I1);
27             _delay_us(1);
28         }
29
30         // gib zunächst 20 Nullen aus
31         for(uint16_t i=0;i<20;i++)
32             Serial.println(0);
33
34         // gib die eingelesenen 480 Werte aus
35         for(uint16_t i=0;i<EVENT_TIME;i++)
36             Serial.println(event[i]);
37
38         // Warte eine Sekunde
39         delay(1000);
40     }
41 }
```

Der Sketch wartet in Zeile 22 darauf, dass die Taste an Eingang I1 gedrückt wird. Daraufhin zeichnet er für eine kurze Weile den Zustand des Eingang I1 auf. In Zeile 9 ist festgelegt, dass 480 Werte aufgezeichnet werden. Zwischen zwei Aufzeichnungen wird in Zeile 27 jeweils eine Mikrosekunde gewartet, so dass insgesamt über 480 Mikrosekunden aufgezeichnet wird. Ist die Aufzeichnung vollständig, dann werden zunächst 20 Zeilen Nullen ausgegeben und danach die vorher aufgezeichneten 480 Werte, so dass insgesamt 500 Werte ausgegeben werden. Die ersten 20 Werte repräsentieren den Zustand vor der Aufzeichnung, als der Taster noch nicht gedrückt wurde.

Die insgesamt 500 Werte stellt der serielle Plotter als Kurve dar. Der Wert ist null, wenn der Kontakt als offen erkannt wird und eins, sobald der Kontakt geschlossen ist. Man sieht in der Grafik, wie der Taster zunächst circa 40 Mikrosekunden lang mehrfach öffnet und schließt, dann liegt das Signal über 100 Mikrosekunden stabil an, bevor der Kontakt noch ein paar mal öffnet, um schließlich nach insgesamt 200 Mikrosekunden stabil geschlossen zu bleiben. Die in Lösung 1 eingesetzte Pause kann also auf gute 200 Mikrosekunden reduziert werden, ohne dass das Prellen Auswirkungen hätte.

Es ist nötig, die Werte vor der Ausgabe komplett zu erfassen und zu speichern, da die Übermittlung der Zeichen an den PC vergleichsweise viel Zeit in Anspruch nimmt. Würden die Werte sofort an den PC übermittelt, dann wäre die Auflösung von einer Mikrosekunde nicht zu erreichen, da die Datenübermittlung selbst schon länger dauert. Tatsächlich dauert auch

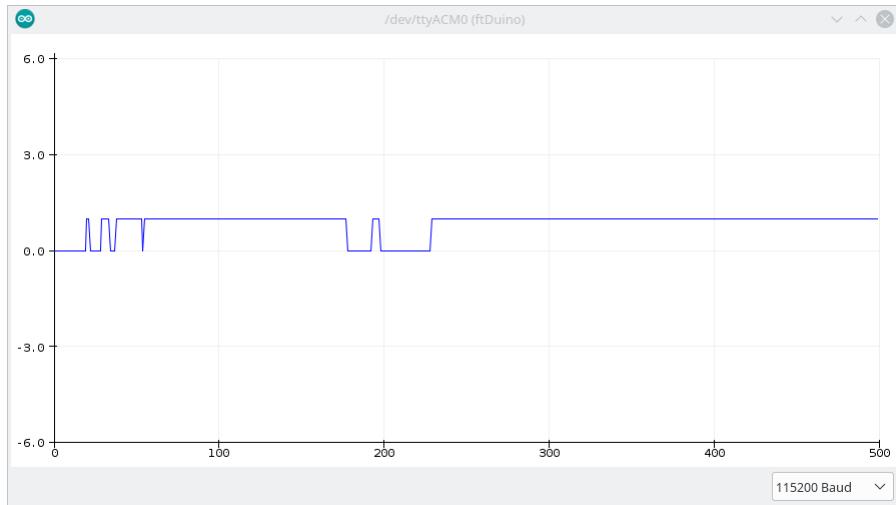


Abbildung 6.29: Verlauf des Prellens im seriellen Plotter

das Auslesen des Eingangs I1 etwas Zeit und das Zeitverhalten unserer Messung ist nicht sehr genau. Es genügt aber, um die prinzipiellen Abläufe darzustellen.

6.13 Nutzung des I²C-Bus

Schwierigkeitsgrad: ★★★★☆

Wie in Abschnitt 1.2.6 beschrieben verfügt der ftDuino über einen I²C-Anschluss. In der Arduino-Welt ist der I²C-Bus äußerst beliebt, denn er erlaubt den einfachen Anschluss einer Vielzahl von preisgünstigen Erweiterungsbausteinen.

Der ftDuino wird mit einer Schutzkappe auf dem I²C-Anschluss ausgeliefert wie in Abschnitt 1.2.6 abgebildet. Diese Kappe muss vor Benutzung des I²C-Anschlusses entfernt werden.

Mit wenig Aufwand lassen sich die meisten Sensoren mit einem passenden Anschlusskabel für den ftDuino versehen. In Abbildung 6.30 ist beispielhaft die Verkabelung einer typischen im Online-Handel günstig erhältlichen MPU6050-Sensorplatine dargestellt. Der Sensor ist damit direkt an den ftDuino anschließbar.

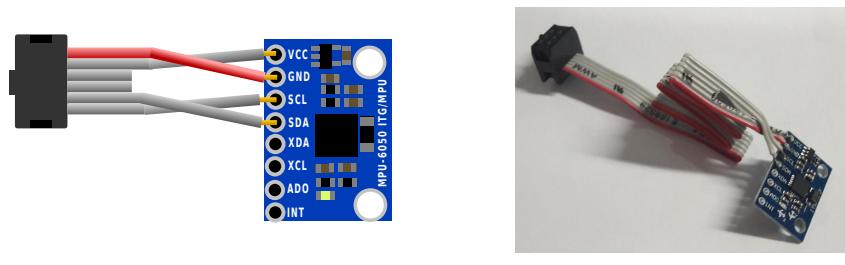


Abbildung 6.30: MPU6050-Sensor mit Anschlusskabel für den ftDuino

Um den jeweiligen Sensor in eigenen Projekten zu verwenden sind in der Regel zusätzliche Code-Routinen oder Bibliotheken nötig. Die große Verbreitung der Arduino-Plattform führt dazu, dass man zu praktisch jedem gängigen Sensor mit wenig Suche passende Beispiele und Code-Bibliotheken findet¹².

¹²Eine große Sammlung von Sensorbibliotheken findet sich unter <https://github.com/ControlEverythingCommunity>.

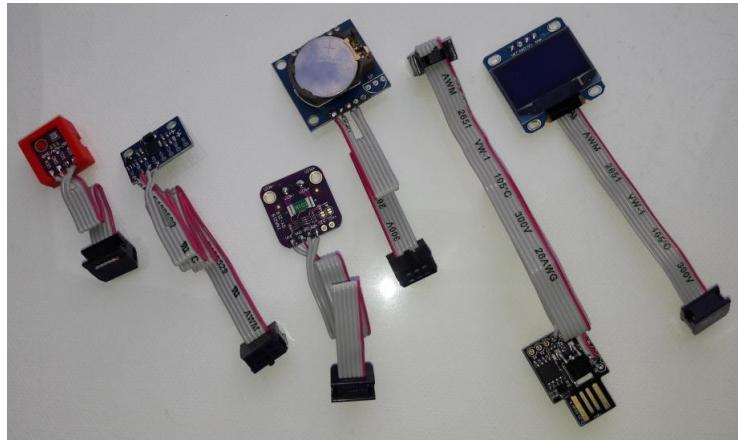


Abbildung 6.31: Diverse I²C-Sensoren mit passendem Anschlusskabel an den ftDuino

6.13.1 Sketch I2C/I2cScanner

Für einen schnellen Test, ob die elektrische Verbindung zum Sensor korrekt ist reicht aber in der Regel ein einfacher Test der I²C-Kommunikation aus. Unter **Datei > Beispiele > FtduinoSimple > I2C > I2cScanner** findet sich ein einfaches I²C-Testprogramm, das am I²C-Bus nach angeschlossenen Sensoren sucht und deren Adresse ausgibt. Die jeweilige Adresse eines Sensors wird in der Regel vom Sensorhersteller fest vergeben. Im Falle des MPU-6050 ist dies die Adresse 0x68. Diese Adresse wird bei korrektem Anschluss des Sensors angezeigt.

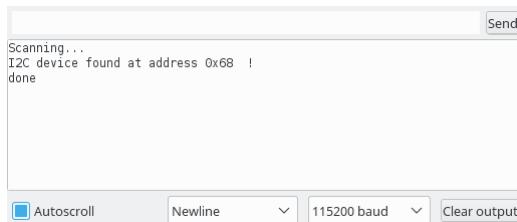


Abbildung 6.32: Ausgabe von I2cScanner bei angeschlossenem MPU-6050

6.13.2 MPU-6050-Sensor

Für den MPU6050 liefert die ftDuino-Umgebung ein eigenes Beispiel mit. Der Beispiel-Sketch unter **Datei > Beispiele > FtduinoSimple > I2C > MPU6050Test** liest die Beschleunigungswerte aus dem MPU-6050 aus und gibt sie auf dem seriellen Monitor aus.

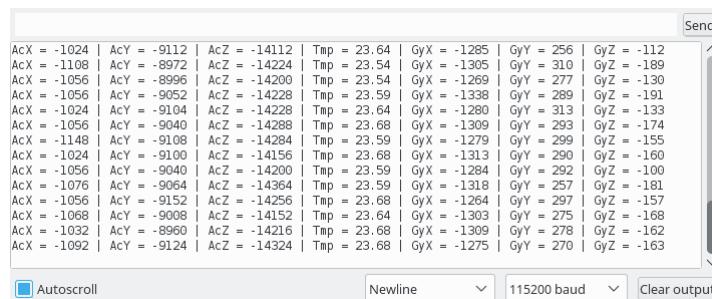


Abbildung 6.33: Ausgabe von MPU6050Test

6.13.3 OLED-Display

Eine weitere naheliegenden Anwendung des I²C-Anschlusses ist der Anschluss eines kleinen Displays, mit dem z.B. direkt am ftDuino Messwerte ausgegeben werden können.

Für wenig Geld gibt es im Online-Handel OLED-Displays mit 0,96 Zoll Bilddiagonale. Mit einer Größe von etwas unter 3*3cm² eignen sich diese Displays auch sehr gut für den Einbau in ein entsprechendes fischertechnik-kompatibles Gehäuse¹³.

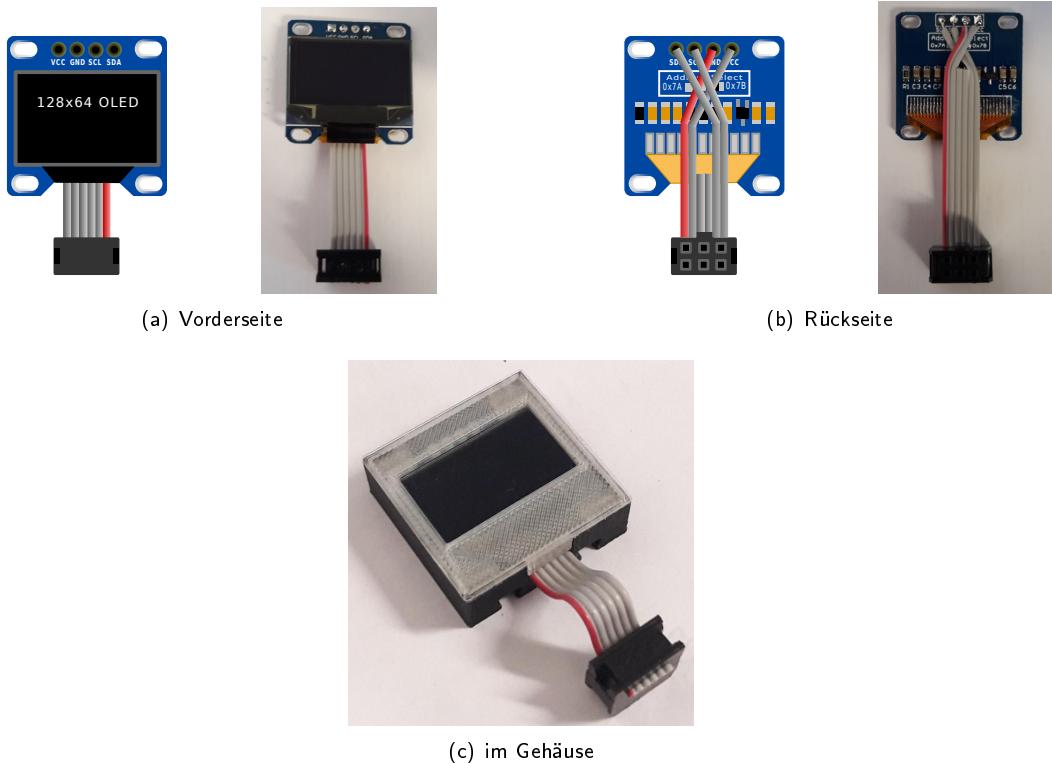


Abbildung 6.34: OLED-Display mit Anschlusskabel für den ftDuino

Beim Anlöten des Kabels muss man sich unbedingt am Aufdruck auf der Display-Platine und nicht an den Skizzen hier orientieren, da es in der Anschlussbelegung Unterschiede zwischen den ansonsten baugleichen Displays gibt.

Dieses Display verwendet als Display-Controller-Baustein den SSD1306¹⁴ von Solomon Systech. Diese Display-Sorte ist im Arduino-Umfeld sehr beliebt und passende Bibliotheken gibt es im Internet^{15 16}.

Wichtig: Wie viele andere I²C-Sensoren auch ist das OLED-Display nicht ftDuino-spezifisch, sondern wird auch in anderen Arduino-Projekten eingesetzt. Daher ist dessen Unterstützung kein Teil der ftDuino-Installation, sondern es müssen die o.g. Adafruit-Bibliotheken unbedingt separat installiert werden. Andernfalls wird die Übersetzung des Sketches mit einer Meldung der Art "fatal error: Adafruit_GFX.h: No such file or directory" oder ähnlich abgebrochen.

Zum Displaytest bringt die Adafruit_SSD1306-Bibliothek unter `Datei > Beispiele > Adafruit SSD1306 > ssd1306_128x64_i2c` ein Beispiel.

Hinweis: In früheren Versionen dieses Handbuchs wurde an dieser Stelle eine manuelle Änderung der Bibliothek beschrieben, die für das 128x64-Display nötig war. In der aktuellen Version der Adafruit-SSD1306-Bibliothek ist diese Anpassung nicht mehr nötig. Die Beispiele wurden ebenfalls entsprechend angepasst.

Dabei muss im Sketch selbst die I²C-Adresse von 0x3D nach 0x3C angepasst werden:

¹³<https://www.thingiverse.com/thing:2542260>

¹⁴Datenblatt des SSD1306: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf>

¹⁵Adafruit-SSD1306-Bibliothek: https://github.com/adafruit/Adafruit_SSD1306

¹⁶Adafruit-GFX-Bibliothek: <https://github.com/adafruit/Adafruit-GFX-Library>

```

60     // by default, we'll generate the high voltage from the 3.3v line internally! (neat!)
61     display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C); // initialize with the I2C addr 0x3D (for the
62         128x64)
63     // init done

```

Die **ftDuino**-Installation selbst bringt ebenfalls ein Beispiel mit, das dieses Display verwendet. Das Shootduino-Spiel findet sich unter **Datei > Beispiele > FtduinoSimple > Shootduino**. Das Spiel erwartet drei Taster an den Eingängen I1, I2 und I3 zur Steuerung des Raumschiffs und gegebenenfalls eine Lampe an O1.

6.13.4 VL53L0X LIDAR-Distanzsensor

Fischertechnik liefert einen Ultraschallsensor zur Distanzmessung, der wie in Abschnitt 1.2.6 gezeigt auch am **ftDuino** betrieben werden kann. Dieser Ultraschallsensor sendet einen Ultraschallimpuls aus und misst die Laufzeit, bis die Schallwelle ein Hindernis erreicht und zum Sensor zurück reflektiert. Aus der Laufzeit und der bekannten Schallgeschwindigkeit lässt sich so die Distanz bestimmen.

In der Arduino-Welt gibt es eine interessante Alternative in Form des VL53L0X-Laser-Distanzsensors. Das Funktionsprinzip gleicht dem des Ultraschallsensors, allerdings kommt kein Schall, sondern Laserlicht zu Einsatz. Der VL53L0X lässt sich recht leicht über I²C mit dem **ftDuino** verbinden.

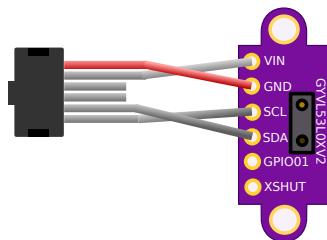


Abbildung 6.35: Anschlusschema des VL53L0X an den **ftDuino**

Ein passendes Gehäuse zum selbst-drucken findet sich im **ftDuino**-Repository¹⁷.

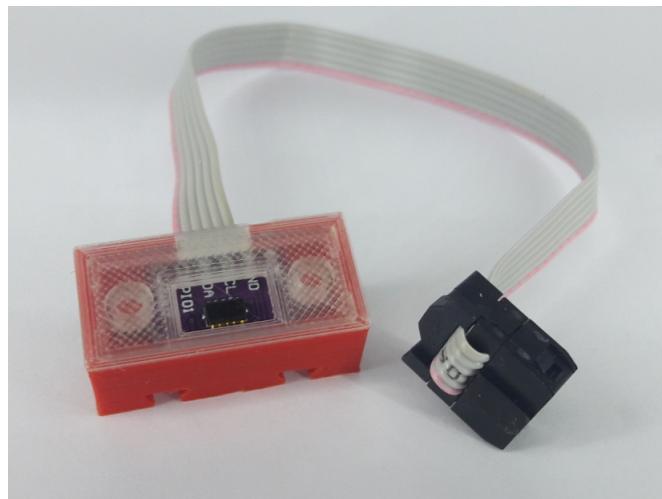


Abbildung 6.36: VL53L0X in 3D-gedrucktem Gehäuse

Wie für fast alle üblichen I²C-Sensoren findet man auch beim VL53L0X bereits fertige Arduino-Bibliotheken und -Sketches im Internet¹⁸.

¹⁷VL53L0X-Gehäuse: <https://github.com/harbaum/ftduino/tree/master/addons/vl53l0x>

¹⁸Adafruit-Bibliothek für den VL53L0X: https://github.com/adafruit/Adafruit_VL53L0X

6.13.5 ftDuino als I²C-Client und Kopplung zweier ftDinos

Der ftDuino kann nicht nur andere Geräte über den I²C-Bus ansprechen, er kann sich selbst auch als passives Gerät am Bus ausgeben, um von einem anderen Gerät angesprochen zu werden.

Am einfachsten lässt sich diese Möglichkeit nutzen, wenn zwei ftDinos direkt über I²C gekoppelt werden.

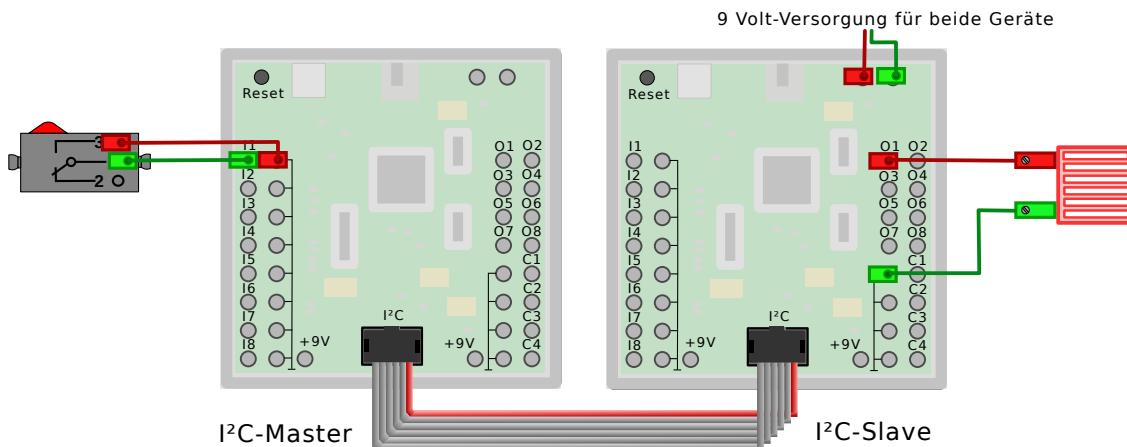


Abbildung 6.37: Kopplung zweier ftDinos über I²C

Es wird dazu eine 1:1-Verbindung zwischen den beiden I²C-Anschlüssen der beteiligten Controller hergestellt. Ein Controller muss in diesem Aufbau als Master konfiguriert werden, einer als Slave. Entsprechende Beispiel-Sketches finden sich unter `Datei > Beispiele > FtduinoSimple > I2C > I2cMaster` und `Datei > Beispiele > FtduinoSimple > I2C > I2cSlave`.

Der Master fragt kontinuierlich einen an Eingang I1 angeschlossenen Taster ab und sendet den Zustand des Tasters über I²C an den zweiten, als Slave konfigurierten ftDuino. Dieser schaltet dann eine Lampe am Ausgang 01 entsprechend ein oder aus.

Die Spannungsversorgung des Masters kann dabei über die I²C-Verbindung erfolgen. Lediglich der Slave muss direkt mit 9 Volt versorgt sein, um die Lampe am Ausgang steuern zu können. Die Versorgung über I²C entspricht der Versorgung über USB mit den bekannten Einschränkungen wie in Abschnitt 1.2.5 beschrieben.

Erweiterter I2cSlave

Neben dem einfachen Beispiel `Datei > Beispiele > FtduinoSimple > I2C > I2cSlave`, das auf der funktionsreduzierten FtduinoSimple-Bibliothek aufbaut befindet sich unter `Datei > Beispiele > Ftduino > I2C > I2cSlave` ein auf der vollwertigen Bibliothek aufbauendes Beispiel, das die meisten Ein- und Ausgabefähigkeiten des ftDuino über I²C verfügbar macht.

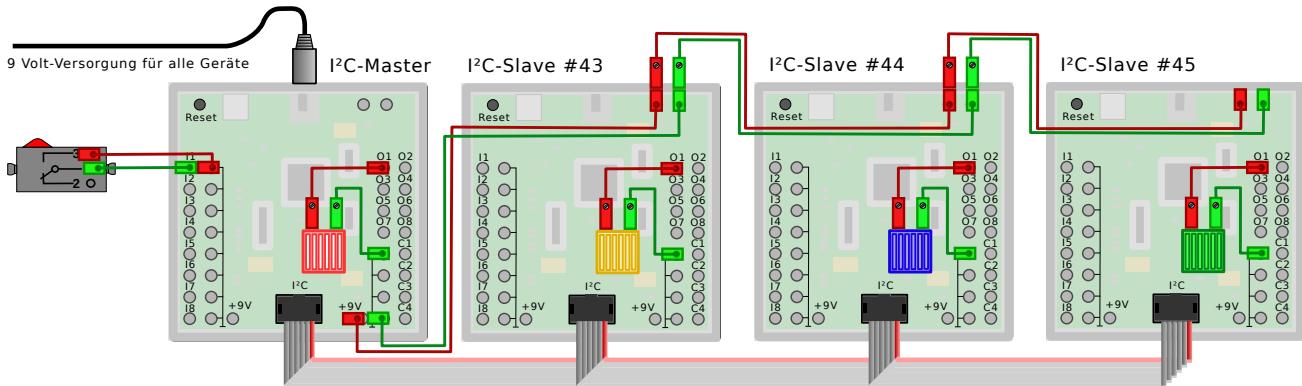
Dieser erweiterte Sketch eignet sich als Basis für komplexe Modelle. Das hier abgebildete Beispiel verwendet drei ftDinos zur Erweiterung des Master-ftDuino um weitere 24 Aus- und 36 Eingänge.

Der erste ftDuino im Bild ganz links bildet den Master, gefolgt von den drei Slaves. Auf dem ersten Slave läuft das unveränderte Beispiel aus `Datei > Beispiele > Ftduino > I2C > I2cSlave`. Für die weiteren Slaves muss die I²C-Adresse im Sketch jeweils angepasst werden. Das geschieht, indem in Zeile 16 im I2cSlave-Sketch die Adresse 43 ersetzt wird durch 44 bzw 45 für die beiden weiteren Slaves.

```

13 void setup() {
14   pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT); // LED initialisieren
15
16   Wire.begin(43);           // tritt I2C-Bus an Adresse #43 als "Slave" bei
17   Wire.onReceive(receiveEvent); // Auf Schreib-Ereignisse registrieren
18   Wire.onRequest(requestEvent); // Auf Lese-Ereignisse registrieren
19
20   ftduino.init();
21

```

Abbildung 6.38: Kopplung von vier ftDuinos über I²C

```

22     // alle Ausgänge sind hochohmig
23     memset(&output_mode, 0, sizeof(output_mode));
24 }

```

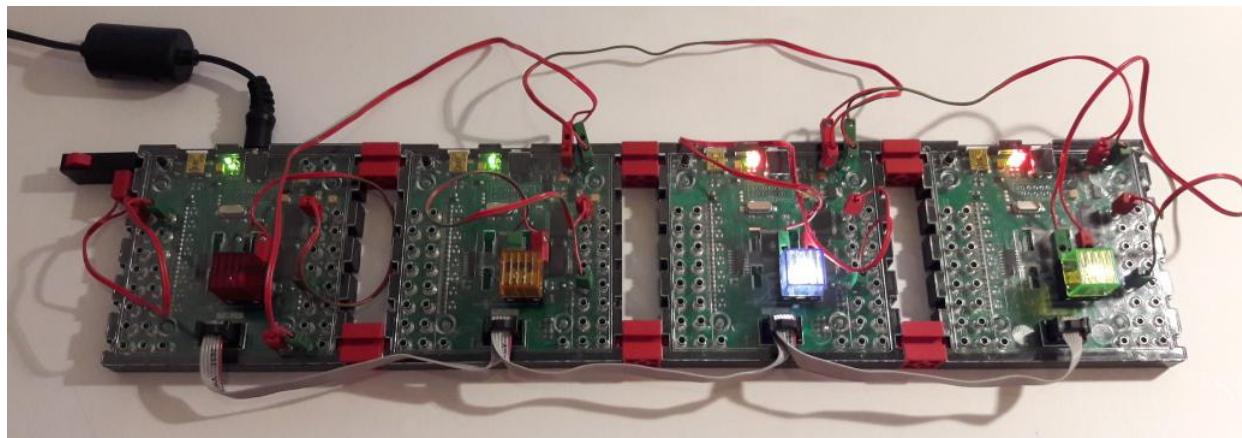
Der Master enthält in diesem Fall die gesamte eigentliche Programmlogik und die Slaves nehmen fundamentale Steuerbefehle über I²C entgegen. Der Master-Sketch findet sich unter Datei ▷ Beispiele ▷ Ftduino ▷ I2C ▷ I2cMaster. In Zeile 12 sind dort die Adressen 43, 44 und 45 der drei Slaves bereits eingestellt. Sollen mehr oder weniger Slaves verwendet werden, so ist die Zeile 12 entsprechend anzupassen.

```

9 // Liste der anzusteuernden I2c-Clients, beginnend mit 0 (der Master selbst)
10 // und -1 als Endemarkierung. In diesem Fall sind drei Clients unter den Adressen
11 // 43, 44 und 45 angeschlossen
12 static const int8_t clients[] = { 0, 43, 44, 45, -1 };

```

Die Stromversorgung aller vier ftDuinos kann aus einem fischertechnik-Netzteil erfolgen, das an den Master angeschlossen wird. Die Slaves werden dann vom 9-Volt-Ausgang des Masters über zweipolare fischertechnik-Kabel versorgt.

Abbildung 6.39: Vier ftDuinos über I²C gekoppelt

Das Beispiel Datei ▷ Beispiele ▷ Ftduino ▷ I2C ▷ I2cMaster eignet sich als Vorlage für komplexe Modelle. Je nach Modell kann es aber praktischer sein, auch die Slaves zu verändern und zu erweitern. Geräte bei Modellen mit weitgehend eigenständigen Untereinheiten (z.B. Taktstraße) kann es einfacher sein, die einzelnen Stationen jeweils von einem ftDuino weitgehend autonom steuern zu lassen und die I²C-Kommunikation auf das nötigste zu reduzieren, um z.B. die Ankunft eines neuen Bauteils in der Station anzukündigen.

Die folgenden Tabelle listet die I²C-Register, wie sie vom I2cSlave.ino für den ftDuino implementiert werden. Werte mit vorangestelltem 0x sind in Hexadezimalschreibweise dargestellt.

Registerbelegungen für Ausgänge O1 bis O8 bzw. M1 bis M4

0x00	Ausgangs-Modus O1/M1 0x0x - Betrieb als Einzelausgang 0x00 - Einzelausgang offen/hochohmig (tristate) 0x01 - Einzelausgang gegen +9V geschaltet (High) 0x02 - Einzelausgang gegen Masse geschaltet (Low) 0x1x - Ausgang mit O2 zum Motorausgang M1 gekoppelt 0x10 - Motorausgang ungebremst aus (off) 0x11 - Motorausgang gebremst aus (brake) 0x12 - Motorausgang links drehend an 0x13 - Motorausgang rechts drehend an
0x01	Ausgangswert (PWM) O1/M1 von 0 (aus) bis 255 (100% an) Der Zustand des Hardwareausgangs wird beim Schreiben dieses Registers aktualisiert
0x02	Ausgangs-Modus O2 Der Inhalt dieses Registers wird ignoriert, wenn Ausgangs-Modus O1/M1 (Register 0x00) den Wert 0x1x enthält 0x00 - Einzelausgang offen/hochohmig (tristate) 0x01 - Einzelausgang gegen +9V geschaltet (High) 0x02 - Einzelausgang gegen Masse geschaltet (Low)
0x03	Ausgangswert (PWM) O2 von 0 (aus) bis 255 (100% an) Der Inhalt dieses Registers wird ignoriert, wenn Ausgangs-Modus O1/M1 (Register 0x00) den Wert 0x1x enthält Der Zustand des Hardwareausgangs wird beim Schreiben dieses Registers aktualisiert
0x04	Ausgangs-Modus O3/M2, siehe Ausgang-Modus O1 (Register 0x00)
0x05	Ausgangswert O3/M2, siehe Ausgangswert O1 (Register 0x01)
0x06	Ausgangs-Modus O4, siehe Ausgang-Modus O2 (Register 0x02)
0x07	Ausgangswert O4, siehe Ausgangswert O2 (Register 0x03)
0x08	Ausgangs-Modus O5/M3, siehe Ausgang-Modus O1 (Register 0x00)
0x09	Ausgangswert O5/M3, siehe Ausgangswert O1 (Register 0x01)
0x0a	Ausgangs-Modus O6, siehe Ausgang-Modus O2 (Register 0x02)
0x0b	Ausgangswert O6, siehe Ausgangswert O2 (Register 0x03)
0x0c	Ausgangs-Modus O7/M4, siehe Ausgang-Modus O1 (Register 0x00)
0x0d	Ausgangswert O7/M4, siehe Ausgangswert O1 (Register 0x01)
0x0e	Ausgangs-Modus O8, siehe Ausgang-Modus O2 (Register 0x02)
0x0f	Ausgangswert O8, siehe Ausgangswert O2 (Register 0x03)

Registerbelegungen für Eingänge I1 bis I8

Es können maximal die beiden Bytes eines Eingangs in einem gemeinsamen I2C-Transfer gelesen werden. Jeder Eingang muss einzeln gelesen werden.

0x10	schreiben: Eingangs-Modus I1 0x00 - Spannung 0x01 - Widerstand 0x02 - Schalter lesen: Eingangswert I1, Low-Byte (LSB)
0x11	lesen: Eingangswert I1, High-Byte (MSB)
0x12	Eingangs-Modus/Eingangswert I2, siehe Eingangs-Modus I1 (Register 0x10)
0x13	Eingangswert I2, siehe Eingangswert I1 (Register 0x11)
0x14	Eingangs-Modus/Eingangswert I3, siehe Eingangs-Modus I1 (Register 0x10)
0x15	Eingangswert I3, siehe Eingangswert I1 (Register 0x11)
0x16	Eingangs-Modus/Eingangswert I4, siehe Eingangs-Modus I1 (Register 0x10)
0x17	Eingangswert I4, siehe Eingangswert I1 (Register 0x11)
0x18	Eingangs-Modus/Eingangswert I5, siehe Eingangs-Modus I1 (Register 0x10)
0x19	Eingangswert I5, siehe Eingangswert I1 (Register 0x11)
0x1a	Eingangs-Modus/Eingangswert I6, siehe Eingangs-Modus I1 (Register 0x10)
0x1b	Eingangswert I6, siehe Eingangswert I1 (Register 0x11)
0x1c	Eingangs-Modus/Eingangswert I7, siehe Eingangs-Modus I1 (Register 0x10)
0x1d	Eingangswert I7, siehe Eingangswert I1 (Register 0x11)
0x1e	Eingangs-Modus/Eingangswert I8, siehe Eingangs-Modus I1 (Register 0x10)
0x1f	Eingangswert I8, siehe Eingangswert I1 (Register 0x11)

Registerbelegungen für Zählereingänge C1 bis C4

0x20	schreiben: Zähler-Modus C1 0x00 - aus 0x01 - steigende Flanke 0x02 - fallende Flanke 0x03 - beide Flanken 0x04 - Ultraschallsensor aktivieren lesen: Eingangszustand C1
0x21	schreiben: Zähler C1 0x00 - Zähler unverändert lassen sonst - Zähler löschen lesen: Zählerstand C1/Ultraschall-Distanz, Low-Byte (LSB)
0x22	Zählerstand C1/Ultraschall-Distanz, High-Byte (MSB)
0x24	schreiben: Zähler-Modus C2 0x00 - aus 0x01 - steigende Flanke 0x02 - fallende Flanke 0x03 - beide Flanken lesen: Eingangszustand C2
0x25	schreiben: Zähler C2 0x00 - Zähler unverändert lassen sonst - Zähler löschen lesen: Zählerstand C2, Low-Byte (LSB)
0x26	Zählerstand C2, High-Byte (MSB)
0x28	Zähler-Modus C3, siehe Zähler-Modus C2 (Register 0x24)
0x29	Zählerstand C3, Low-Byte (LSB), siehe Zählerstand C2 (Register 0x25)
0x2a	Zählerstand C3, High-Byte (MSB), siehe Zählerstand C2 (Register 0x26)
0x2c	Zähler-Modus C4, siehe Zähler-Modus C2 (Register 0x24)
0x2d	Zählerstand C4, Low-Byte (LSB), siehe Zählerstand C2 (Register 0x25)
0x2e	Zählerstand C4, High-Byte (MSB), siehe Zählerstand C2 (Register 0x26)

ftDuino als I²C-Slave am PC

Natürlich lässt sich der ftDuino als I²C-Slave nicht nur an anderen ftDuinos betreiben, sondern auch an PCs und anderen Geräten, wenn sie mit einer entsprechenden I²C-Schnittstelle ausgerüstet sind. Im Fall eines PCs lässt sich die nötige I²C-Schnittstelle auch mit Hilfe eines einfachen Adapters über USB nachrüsten. Ein solcher Adapter ist der i2c_tiny_usb¹⁹.

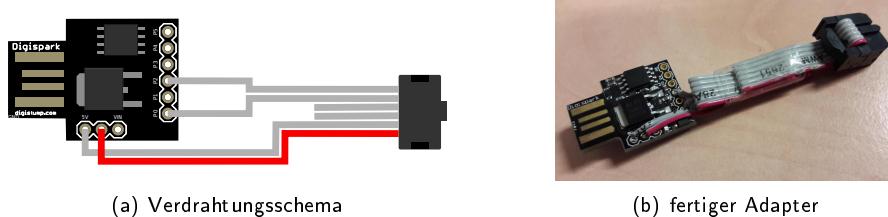


Abbildung 6.40: Digispark/i2c_tiny_usb zum Anschluss an den I²C des ftDuino

Auf einem Linux PC²⁰ kann das Programm i2c_detect verwendet werden. Mit dem Parameter -l kann man sich zunächst eine Liste aller im PC installierten I²C-Busse anzeigen lassen.

```
$ i2cdetect -l
i2c-3  unknown          i915 gmbus dpc           N/A
i2c-1  unknown          i915 gmbus vga          N/A
i2c-8   i2c              em2860 #0           I2C adapter
i2c-6  unknown          DPDDC-B            N/A
i2c-4  unknown          i915 gmbus dpb          N/A
i2c-2  unknown          i915 gmbus panel        N/A
i2c-0  unknown          i915 gmbus ssc          N/A
i2c-9   i2c              i2c-tiny-usb at bus 001 device 023  I2C adapter
i2c-7  unknown          DPDDC-C            N/A
i2c-5  unknown          i915 gmbus dpd          N/A
```

Der Digispark/i2c_tiny_usb erscheint in diesem Fall als i2c-9. Unter dieser Bus-Nummer lässt sich der I²C-Bus des i2c_tiny_usb nach Geräten absuchen.

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

In diesem Fall wurde unter Adresse \$2a (dezimal 42) der auf der FtduinoSimple-Bibliothek basierende einfache I2cSlave des ftDuino erkannt.

Im Repository²¹ findet sich ein Python-Beispiel, mit dem vom PC aus auf den ftDuino zugegriffen werden kann. Für die umfangreichere auf der Ftduino-Bibliothek basierende Variante gibt es ebenfalls ein Python-Beispiel im Repository²².

ftDuino als I²C-Slave am TXT

Wie im Abschnitt 6.13 erwähnt ist mit 3,3 Volt betriebene I²C-Anschluss des fischertechnik-TXT-Controllers nicht elektrisch kompatibel zum mit 5 Volt betriebenen I²C-Anschluss des ftDuino.

¹⁹Weitere Infos zum i2c_tiny_usb finden sich unter <https://github.com/harbaum/I2C-Tiny-USB>

²⁰Auch der Raspberry-Pi oder der fischertechnik TXT sind Linux-PCs

²¹ <https://harbaum.github.io/ftduino/ftduino/libraries/FtduinoSimple/examples/I2C/I2cSlave/master.py>

²² <https://harbaum.github.io/ftduino/ftduino/libraries/Ftduino/examples/I2C/I2cSlave/master.py>

Einfacher Levelshifter

Mit Hilfe eines passenden Pegel-Wandlers kann man aber leicht die nötige Signalanpassung vornehmen. Die Elektronik dazu ist preisgünstig im Online-Handel erhältlich. Man sollte darauf achten, dass die Elektronik die Spannungsversorgung der 3,3-Volt-Seite selbst aus der Versorgung der 5-Volt-Seite erzeugt, da der TXT selbst keine 3,3 Volt zur Verfügung stellt.

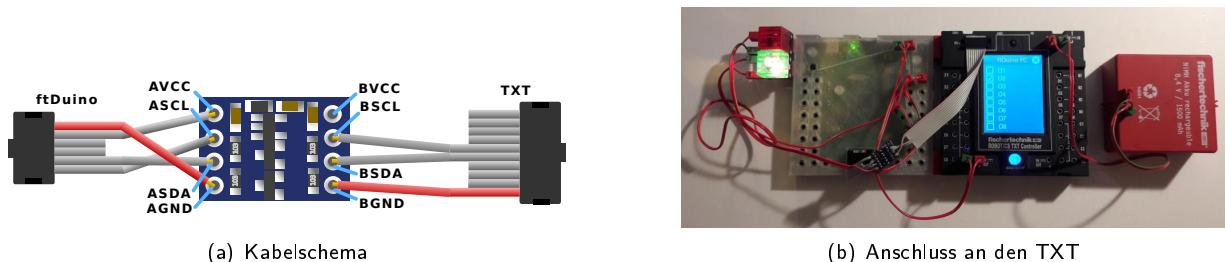


Abbildung 6.41: Levelshifter zur Verbindung von TXT und ftDuino

6.13.6 ftDuino-I²C-Expander

Die Funktion eines Levelshifters erfüllt auch der sogenannte I²C-Expander²³. Dieses Gerät wurde zum Einsatz am ftDuino entworfen, kann aber auch am TXT oder TX betrieben werden.

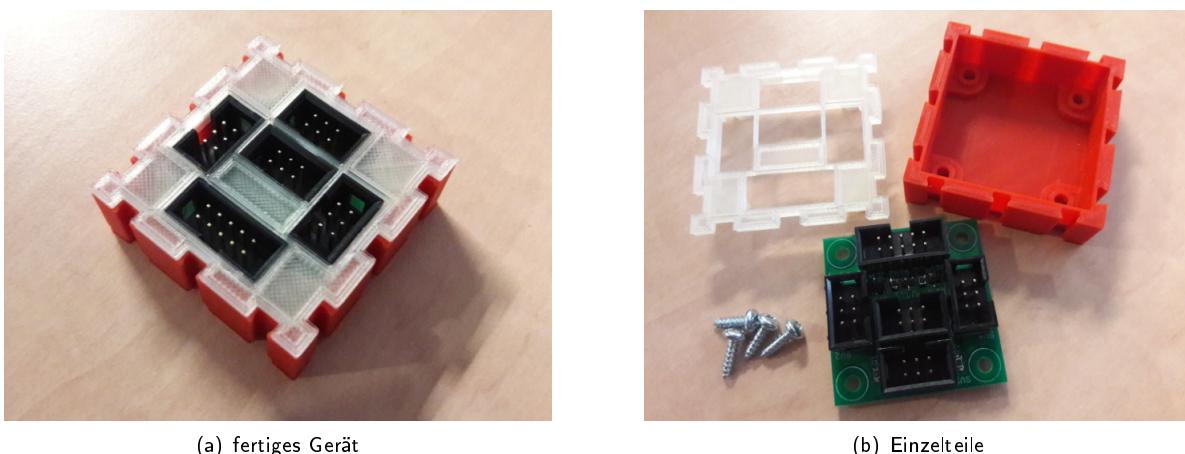


Abbildung 6.42: I²C-Expander für den ftDuino

Der I²C-Expander stellt einen TXT-kompatiblen 10-poligen I²C-Anschluss bereit und vier 6-polige TX- bzw. ftDuino-kompatible. Die vier ftDuino-kompatiblen Anschlüsse sind 1-zu-1 verbunden und können zum Anschluss mehrerer I²C-Geräte an den ftDuino verwendet werden. Zusätzlich ist eine Levelshifter enthalten, der einen Anschluss an den TXT bzw. an dessen Sensoren erlaubt. Die Spannungsversorgung des Levelshifters erfolgt vom ftDuino.

Eine passende App für die Community-Firmware des fischertechnik-TXT-Controllers findet sich im cfw-apps-Repository²⁴.

Da I²C-Geräte am TXT auch unter RoboPro und der Originalfirmware angesteuert werden können lässt sich der ftDuino auf diese Weise auch unter RoboPro als Erweiterung des TXT nutzen.

6.13.7 fischertechnik-Orientierungssensor

Das Kabel zum Anschluss des ftDuino an den TXT und der I²C-Expander sind nicht auf eine feste Richtung festgelegt. Sie können daher auch dazu verwendet werden, für den TXT entworfene Sensoren an den ftDuino anzuschließen.

²³ Der ftDuino-I²C-Expander: <https://github.com/harbaum/ftduino/tree/master/addons/i2c-expander>

²⁴ <https://github.com/harbaum/cfw-apps/tree/master/packages/ftDuinoI2C>

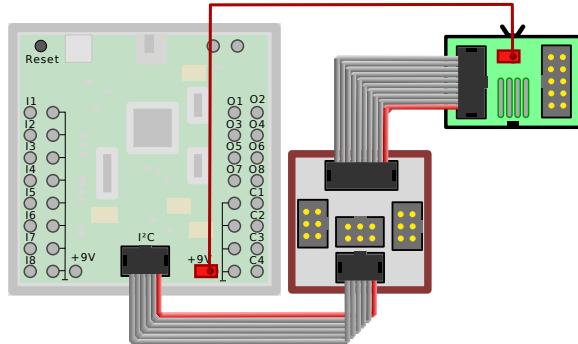


Abbildung 6.43: Anschluss eines fischertechnik-Sensors via I²C-Expander

Getestet wurde dies z.B. mit dem “Kombisensor 158402²⁵ 3-in-1 Orientierungssensor”²⁶ basierend auf dem Bosch BMX055, für den es auch fertige Arduino-Sketches gibt²⁷. Der Anschluss der 9-Volt-Versorgungsspannung erfolgt dabei exakt wie beim TXT an einem der 9-Volt-Ausgänge des ftDuino.

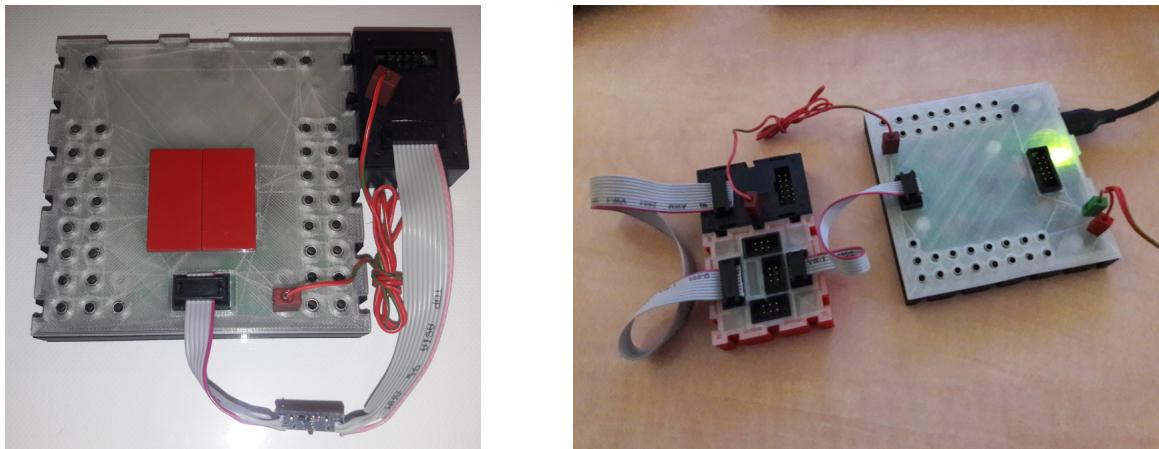


Abbildung 6.44: Orientierungssensor von fischertechnik am ftDuino

6.13.8 fischertechnik-Umweltsensor

Der Umweltsensor aus dem “ROBOTICS TXT Smart Home”-Baukasten 544624²⁸ basiert auf dem BME680²⁹ von Bosch Sensortec. Er beinhaltet Sensoren für Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit und Luftqualität.

Auch für diesen Sensor gibt es im Arduino-Umfeld diverse Bibliotheken, die über den Bibliotheks-Manager der Arduino-IDE leicht zu installieren sind, wie in Abbildung 6.45 zu sehen. Für erste Experimente empfieilt sich die Bibliothek von Adafruit.

Die I²C-Adresse des BME680 ist durch entsprechende Verdrahtung verstellbar. Fischertechnik stellt die Adresse auf 0x76 ein während die Adafruit-Bibliothek den Sensor standardmäßig unter der Adresse 0x77 erwartet. In den Beispielen unter Datei ▷ Beispiele ▷ Adafruit BME680 Library muss daher jeweils die von fischertechnik verwendete Adresse explizit angegeben werden. Der Aufruf der Funktion bme.begin() ist in den Beispielen wie folgt zu ändern:

```
if (!bme.begin(0x76)) {
    Serial.println("Could not find a valid BME680 sensor, check wiring!");
    while (1);
```

²⁵fischertechnik-Datenbank: <https://ft-datenbank.de/tickets?fulltext=158402>

²⁶<https://content.ufgischer.com/cbfiles/fischer/Zulassungen/ft/158402-Kombisensor-Kurzanleitung-BMX055-2017-06-09.pdf>

²⁷<https://github.com/ControlEverythingCommunity/BMX055>

²⁸fischertechnik-Datenbank: <https://ft-datenbank.de/tickets?fulltext=544624>

²⁹Bosch BME680: https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bme680

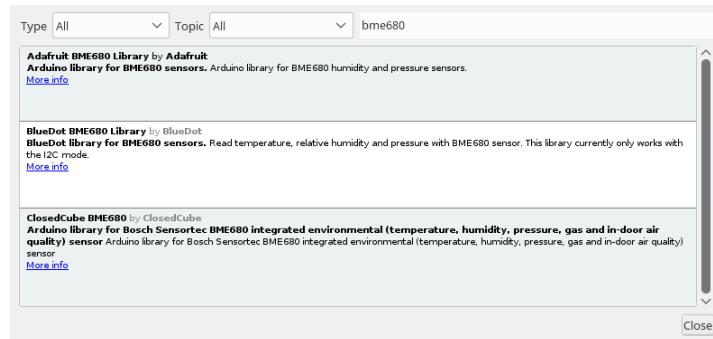


Abbildung 6.45: Arduino-Bibliotheken für den BME680

}

Der Sensor lässt sich mit dem Levelshifter als auch mit dem I²C-Expander betreiben sowie mit dem ft-Extender (siehe Abschnitt 8.5).

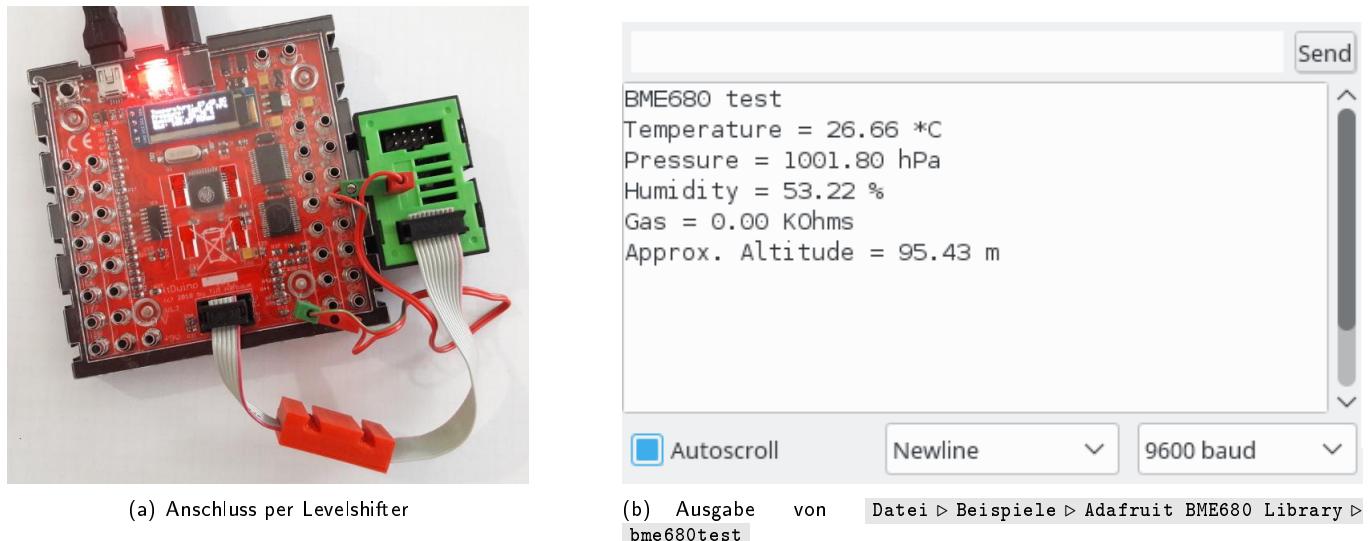


Abbildung 6.46: fischertechnik-Umweltsensor am ftDuino

Die Luftqualität wertet der BME680 durch Erhitzen und Widerstandsmessung aus. Die Adafruit-Bibliothek liefert hier lediglich den wenig aussagekräftigen Widerstandswert. Bosch selbst liefert eine Closed-Source-Bibliothek, um den Wert in den ACQ-Qualitätswert umzurechnen, den auch fischertechnik selbst in seinen Baukästen nutzt. Diese Bibliothek ist auch für den Arduino erhältlich, allerdings ist die Bibliothek zu groß für den Flash-Speicher des ftDuino.

Eine alternative Berechnung eines abstrakten "Air-Quality"-Wertes `airq` sieht wie folgt aus.

```

gas_baseline      = 200000.0;
hum_baseline     = 40.0;
hum_weighting    = 0.25;
gas_offset        = gas_baseline - gas_resistance;
hum_offset        = humidity - hum_baseline;
hum_score         = (100 - hum_baseline - hum_offset) /
                     (100 - hum_baseline) * (hum_weighting * 100);
gas_score         = (gas_resistance / gas_baseline) * (100 - (hum_weighting * 100));
airq              = hum_score + gas_score;
  
```

6.13.9 Mini-I²C-Servo-Adapter

Speziell für den ftDuino wurde der Mini-I²C-Servo-Adapter entworfen. Er vereint trotz seiner geringen Größe eine Spannungsversorgung und eine Servosteuerung in einem Gehäuse.

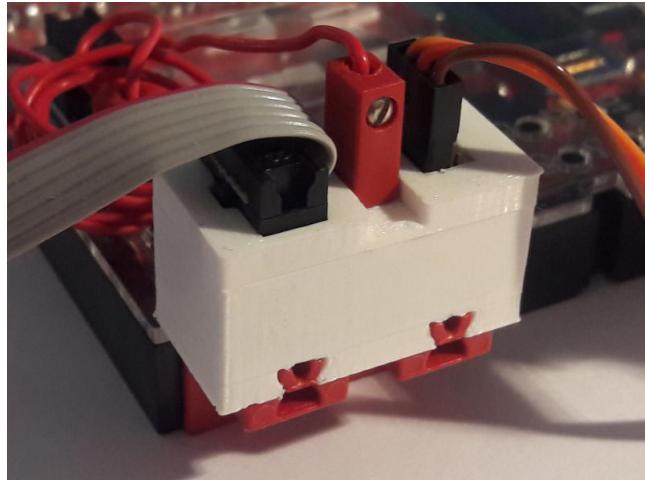


Abbildung 6.47: Der Mini-I²C-Adapter am ftDuino

Anschluss und Inbetriebnahme

Zur Erstinbetriebnahme sollte nur die I²C-Verbindung zwischen ftDuino und Mini-I²C-Adapter hergestellt werden. Generell ist es ratsam, den ftDuino von der Spannungs- und USB-Versorgung zu trennen, während die I²C-Verbindungen hergestellt und getrennt werden. Sobald die Verbindung hergestellt ist kann der ftDuino eingeschaltet werden. Die Leuchtdiode im Mini-I²C-Adapter sollte für ca. eine Sekunde aufleuchten und dann verlöschen.

Auf dem ftDuino sollte für den ersten Test der Datei > Beispiele > FtduinoSimple > I2C > I2cScanner -Sketch installiert werden. Weder 9 Volt noch der Servoanschluss werden für erste Tests benötigt. Der I2cScanner-Sketch sollte nun unter Adresse 0x11 den Adapter finden:

```
I2C Scanner
Scanning...
I2C device found at address 0x11 !
done
```

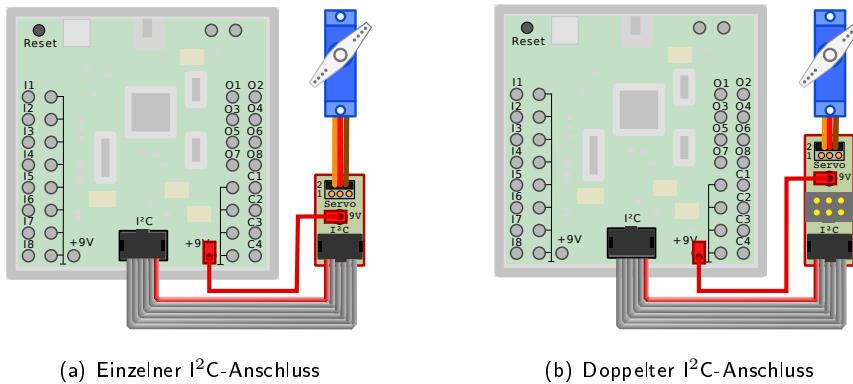
Jedesmal wenn der Adapter vom ftDuino angesprochen wird sollte die Leuchtdiode im Adapter kurz aufleuchten. Sollte dieser Test nicht klappen sollte das I²C-Kabel überprüft werden (sind beiden Stecker korrekt orientiert?). Funktionieren andere Gerät am I²C-Anschluss des ftDuino?

War dieser Test erfolgreich, dann können Servo und 9-Volt-Versorgung angeschlossen werden wie in Abbildung 6.48 zu sehen. Auch hier sollte der ftDuino während der Umverkabelung von der Strom- und USB-Versorgung getrennt werden.

Der Mini-I²C-Servo-Adapter wird zwischen den I²C-Ausgang des ftDuino und den Anschluss des Servos gesteckt. Zusätzlich wird eine 9-Volt-Verbindung zur Spannungsversorgung des Servos benötigt. Der Mini-I²C-Adapter reduziert die fischertechnik-üblichen 9 Volt auf Servo-verträgliche 5 Volt.

Achtung! Die I²C-Anschlüsse des ftDuino, des Mini-I²C-Servo-Adapters und des Servos sind nicht gegen Überspannung geschützt und dürfen nicht mit 9V in Kontakt kommen. Es wird empfohlen, den ftDuino zur Verkabelung spannungslos zu machen.

Sind alle Verbindungen hergestellt kann z.B. der Sketch unter Datei > Beispiele > FtduinoSimple > I2C > MiniServoAdapter verwendet werden. Er steuert kontinuierlich beide Servoausgänge gegenläufig an.

Abbildung 6.48: Anschluss des Mini-I²C-Adapters an den ftDuino

Programmierung

Die Programmierung des Mini-I²C-Servo-Adapters ist recht einfach, ein simples Beispiel findet sich unter [Datei > Beispiele > FtduinoSimple > I2C > MiniServoAdapter](#). Das Setzen eines Ausgangs auf einen Wert benötigt lediglich folgenden Code:

```
Wire.beginTransmission( ADDRESS );
Wire.write(0x00); // 0 = servo 1, 1 = servo 2
Wire.write(94); // Mitte, 63 (ganz links) bis 125 (ganz rechts)
Wire.endTransmission();
```

Registerbelegung

Die Standard-Adresse des Mini-I²C-Servo-Adapters ist hex 0x11 bzw. dezimal 17. Diese Adresse kann permanent geändert werden (s.u.). Sollte man die Adresse vergessen haben, dann hilft der [Datei > Beispiele > FtduinoSimple > I2C > I2cScanner](#)-Sketch, die Adresse des Adapters zu bestimmen.

Register	Beschreibung
0x00/0x01	Setzen der Pulsweite der Servoausgänge 1 oder 2 in Schritten von 16µs. In der Standardeinstellung werden nur Werte im für Servos geeigneten Bereich von 63 (1ms) bis 125 (2ms) akzeptiert. Werte außerhalb dieses Bereiches werden gekappt. Die Grenzen können verändert werden (s.u.).
0x02/0x03	Setzen der unteren Grenze der Pulsweite von Servo 1 bzw. Servo 2 in 16µs-Schritten. Standardwert ist 63. Werte größer als diese Grenze, die in die Register 0x00 und 0x01 geschrieben werden werden auf diese untere Grenze beschränkt.
0x04/0x05	Setzen der oberen Grenze der Pulsweite von Servo 1 bzw. Servo 2 in 16µs-Schritten. Standardwert ist 125. Werte kleiner als diese Grenze, die in die Register 0x00 und 0x01 geschrieben werden werden auf diese obere Grenze beschränkt.
0x06/0x07	Das Schreiben dieses Registers setzt einen Offset für Servo 1 oder 2. Der Standardwert ist 0. Der Offset wird zu der durch Register 0x00 oder 0x01 gesetzten Pulsweite addiert <i>nachdem</i> die Grenzen überprüft wurden. Auf diese Weise lässt sich z.B. die Mittelstellung an die individuellen Eigenschaften eines Servos anpassen.
0x08	Setzen der I ² C-Adressee. Die neue Adresse muss im Bereich von 0x03 bis 0x77 liegen mit Ausnahme von 0x3c (diese Adresse wird vom internen OLED-Display entsprechender ftDuinos verwendet).
0x09	Das Schreiben von 0xa5 in Register 0x09 überträgt speichert die über Register 0x02 bis 0x08 gemachten Einstellungen permanent im EEPROM. Ab diesem Zeitpunkt bleiben die Einstellungen auch über einen Neustart und Stromlosigkeit erhalten.
0x00 lesen	Das Lesen von Register 0x00 liefert die Firmwareversion in BCD-Kodierung zurück. Also beispielsweise 0x10 für Version 1.0
0x01+ lesen	Alle anderen Register liefern beim Lesen 0x5a

Änderung der I²C-Geräteadresse

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben lässt sich die I²C-Adresse des Mini-I²C-Servo-Adapters ändern. Unter **Datei > Beispiele > FtduinoSimple > I2C > MiniServoAddress** findet sich dazu ein fertiger Sketch.

Wird dieser Sketch auf den **ftDuino** geladen, so kann die Adresse interaktiv geändert werden. Dies ist üblicherweise nicht nötig. Erst wenn mehr als ein Mini-I²C-Servo-Adapter gleichzeitig betrieben werden soll, dann ist es nötig, jedem Adapter eine individuelle Adresse zu geben. Dazu wird der zu verstellende Adapter zunächst alleine an den **ftDuino** angeschlossen und die Adresse wie in Abbildung 6.49 zu sehen verändert.

```

>> MiniServoAdapter address changer <<
Searching for MiniServoAdapter ...
I²C device found at address 17 (0x11)
MiniServoAdapter V1.0 found.

Please enter new address: 18
New address 18 (0x12).

Do you really want to change the address (Y/N)?
Address changed!

Searching for MiniServoAdapter ...
I²C device found at address 18 (0x12)
MiniServoAdapter V1.0 found.

Autoscroll Newline 115200 baud Clear output

```

Abbildung 6.49: Änderung der I²C-Adresse des Mini-I²C-Adapter

6.14 WS2812B-Vollfarb-Leuchtdioden

Schwierigkeitsgrad: ★★★★☆

Die Nutzung von WS2812B-Leuchtdioden am **ftDuino** erfordert etwas Lötarbeit sowie die Installation von Hilfs-Bibliotheken. Dieses Projekt wird daher nur einem fortgeschrittenen Nutzer empfohlen.

Der I²C-Anschluss des **ftDuino** ist zwar primär zum Anschluss von I²C-Geräten gedacht. Da die dort angeschlossenen Signale SDA und SCL aber auf frei benutzbaren Anschlüsse des ATmega32u4-Mikrocontrollers liegen können sie auch für andere Signalarten zweckentfremdet werden. Ein solches Signal ist der serielle synchrone Datenstrom, wie ihn die WS2812B-Leuchtdioden verwenden. Diese Leuchtdioden gibt es für kleines Geld als Meterware bei diversen Online-Anbietern.

Um die interne Stromversorgung des **ftDuino** nicht zu überlasten sollten maximal zwei WS2812B-Leuchtdioden an der 5-Volt-Versorgung des I²C-Anschlusses des **ftDuino** betrieben werden. Sollen mehr Leuchtdioden verwendet werden, so ist eine separate externe 5-Volt-Versorgung vorzusehen.

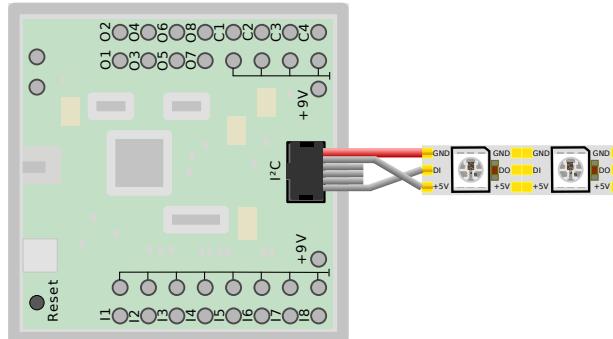


Abbildung 6.50: Anschluss von zwei WS2812B-Vollfarb-Leuchtdioden

Jeder WS2812B-Leuchtdiodenstreifen verfügt über drei Eingangssignale: Masse, +5V und DI. Versorgungssignale Masse und +5V werden direkt mit ihren Gegenstücken am I²C-Anschluss verbunden. Das Signal DI steht für "Data In" und ist der

Datensignaleingang der Leuchtdioden. Der ebenfalls am anderen Ende des Leuchtdiodenstreifens vorhandene Datenausgang (D0) darf nicht verwendet werden. Er leitet das über DI empfangene Signal gegebenenfalls an zusätzliche Leuchtdioden weiter. Das DI-Signal kann wahlweise mit dem SCL oder SDA-Pin des I²C-Anschluss verbunden werden. Der entsprechende Signalname muss später im Sketch eingetragen werden.

Die Leuchtdioden sollten mit Vorsicht angeschlossen werden. Kurzschlüsse oder falsche Verbindungen können die Leuchtdioden und den *ftDuino* beschädigen.

6.14.1 Sketch WS2812FX

Das Beispiel zu Ansteuern der WS2812B-Leuchtdioden sowie die nötige Code-Bibliothek können beispielsweise der WS2812BFX-Bibliothek³⁰ entnommen werden. Andere Bibliotheken zur Ansteuerung der WS2812B-Leuchtdioden dürften gleichermaßen zu nutzen sein.

Die Installation der Bibliothek erfordert etwas Erfahrung mit der Arduino-IDE. Wurde die Bibliothek korrekt installiert, dann finden sich diverse Beispiele unter Datei > Beispiele > WS2812FX . Das Beispiel auto_mode_cycle ist gut geeignet, die Funktion der Leuchtdioden zu überprüfen.

Am Beginn des Sketches sind lediglich zwei kleine Änderungen vorzunehmen, um die Zahl und den verwendeten Anschluss der Leuchtdioden anzupassen.

```
1 #include <WS2812FX.h>
2
3 #define LED_COUNT 2
4 #define LED_PIN SCL
5
6 #define TIMER_MS 5000
```

6.15 Musik aus dem *ftDuino*

Schwierigkeitsgrad: ★★★★☆

Der *ftDuino* verfügt über keinen eingebauten Lautsprecher und kann daher ohne Hilfe keine Töne ausgeben. Es ist aber problemlos möglich, einen Lautsprecher an einen der Ausgänge des *ftDuino* anzuschließen. Dazu eignet sich natürlich besonders gut die fischertechnik Lautsprecherkassette 36936.

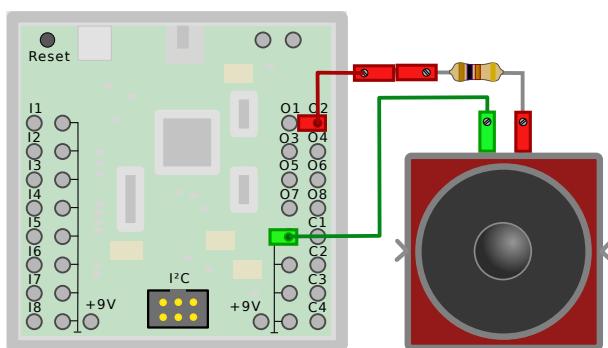


Abbildung 6.51: Anschluss der Lautsprecherkassette an den *ftDuino*

Wichtig ist, dass ein Vorwiderstand von mindestens 100Ω zwischen den Lautsprecher und den *ftDuino* geschaltet wird. Werden die 9 Volt des *ftDuino* direkt auf den Lautsprecher gelegt, dann kann der Lautsprecher sehr leicht Schaden nehmen und erzeugte Töne wären extrem laut. Der Vorwiderstand begrenzt den maximal fließenden Strom und schützt Lautsprecher und Gehör.

Schaltet man nun den Ausgang O2 mit 50% PWM-Verhältnis ein, so kann man das PWM-Signal direkt hören.

³⁰<https://github.com/kitesurfer1404/WS2812FX>

```
farduino.output_set(Farduino::O2, Farduino::H1, Farduino::MAX/2);
```

Durch das 50% PWM-Signal wird der Ausgang permanent zwischen HI und OFF umgeschaltet (siehe auch Abschnitt 6.3). Nur wenn der Ausgang HI ist fließt ein Strom vom Ausgang über den Lautsprecher zum Masse-Anschluss. Da die PWM-Frequenz der Farduino-Bibliothek circa 200 Hertz beträgt hört man dann einen Ton in dieser Frequenz.

Die PWM-Erzeugung wird wie im Abschnitt 6.3 beschrieben nicht über dafür vorgesehene PWM-Ausgänge des ATmega32u4-Mikrocontrollers erzeugt sondern durch Signale, die der Mikrocontroller kontinuierlich über seinen SPI-Bus an die Ausgangstreiber sendet. Dieses Vorgehen ist sehr flexibel und erlaubt es, alle acht Ausgänge mit unabhängigen Signalen zu steuern, es erfordert aber ein konstantes Mitarbeiten des Mikrocontrollers und nimmt einen gewissen Prozentsatz seiner Rechenzeit permanent in Anspruch. Je höher die PWM-Frequenz, desto häufiger muss der Mikrocontroller die Signale ändern und desto höher ist der Bedarf an Rechenzeit, die nicht im eigentlichen Sketch zur Verfügung steht. Bei 200 Hertz ist dieser Effekt zu vernachlässigen. Für eine Tonerzeugung sind aber Frequenzen im Kilohertzbereich nötig. Sollen nicht nur digitale an/aus-Rechtecksignale sondern z.B. auch analoge Sinussignale erzeugt werden, dann sind sogar PWM-Signale im Megahertz-Bereich nötig. Das kann der ATmega32u4 über den SPI-Bus nicht leisten.

Die MC33879-Ausgangstreiber haben jeweils zwei Eingänge³¹, die am SPI-Bus vorbei direkt angesteuert werden können. Im fDuino liegen die meisten dieser Eingänge auf Masse, aber der für den Ausgang O2 zuständige Eingang EN6 des Ausgangstreibers U3 ist mit dem Pin PB7 des ATmega32u4 verbunden. Damit lässt sich einer der Ausgangstransistoren des Ausgangstreibers über diesen Pin am ATmega32u4 direkt schalten. In der Arduino-Welt hat dieser Pin die Nummer 11 und lässt sich mit den üblichen Arduino-Funktionen schalten.

```
// Highside - Treiber von Ausgang O2 für eine Sekunde aktivieren
pinMode(11, OUTPUT);
digitalWrite(11, HIGH);
delay(1000);
digitalWrite(11, LOW);
```

Um den Effekt am Ausgang zu sehen muss die FarduinoSimple-Bibliothek in den Sketch eingebunden sein, da die nach wie vor nötige Initialisierung der Ausgangstreiber durch die Bibliothek erfolgt.

6.15.1 Sketch Music

Schwierigkeitsgrad: ★★★★☆

Alternativ können auf diesen Pin auch die Arduino-Befehle zur Ton-Erzeugung angewendet werden. Der Beispieldsketch unter Datei > Beispiele > FarduinoSimple > Music nutzt dies.

```
// Kammerton A für eine Sekunde spielen
tone(11, 440, 1000);
```

6.15.2 Sketch MusicPwm

Schwierigkeitsgrad: ★★★★☆

Der verwendete Pin PB7 ist Teil des ATmega32u4-internen Timer 1. Das bedeutet, dass spezielle Hardware des ATmega32u4 zur Signalerzeugung herangezogen werden kann. Damit können Signale hoher Frequenz ganz ohne Einsatz von Rechenleistung erzeugt werden.

Der Beispiel-Sketch Datei > Beispiele > FarduinoSimple MusicPwm nutzt das, um die exakt gleiche Melodie wie der vorige Sketch zu erzeugen. Der Code ist deutlich kryptischer und sieht komplizierter aus. Während die Arduino-tone()-Funktion aber im Hintergrund in einem sogenannten Timer-Interrupt Rechenleistung benötigt, um den Ton zu erzeugen werden die Töne in diesem Beispiel allein aus der sogenannten Timer-Hardware des ATmega32u4-Prozessors erzeugt. Lediglich zum Ändern der Tonhöhe oder zum Stoppen der Tonausgabe ist der eigentliche Rechenteil des Prozessors verantwortlich.

In einem einfachem Musik-Beispiel wie diesem ist der Hintergrundbedarf an Rechenleistung zu vernachlässigen. Sollen aber sehr hohe Frequenzen, z.B. im Ultraschallbereich oder höher erzeugt werden, so steigt der Bedarf an Rechenleistung im Hintergrund, da mit höheren Frequenzen häufiger das Signal geändert werden muss. Die Verwendung der Timer-Hardware hat dieses Problem nicht. Die zur Tonerzeugung nötigen Signalwechsel, also das permanente Ein- und Ausschalten des

³¹EN5 und EN6, siehe http://cache.freescale.com/files/analog/doc/data_sheet/MC33879.pdf

Ausgangs in der gewünschten Ton-Frequenz wird automatisch erledigt und benötigt daher auch bei hohen Frequenzen keinerlei Rechenzeit des Mikrocontrollers.

6.16 Der **ftDuino** als MIDI-Instrument

Einen Lautsprecher anzuschließen ist nur eine Art, Töne zu erzeugen. Baukastensysteme wie fischertechnik laden natürlich ein, auf elektromechanische Weise Töne auszugeben z.B. mit Hilfe der Klangrohre aus der Dynamic-Baukastenserie.

Mit seiner flexiblen USB-Schnittstelle bietet der **ftDuino** eine elegante Methode, solche Fähigkeiten nutzbar zu machen. Die sogenannte MIDI-Schnittstelle³² wurde entwickelt, um Computer und elektronische Musikinstrumente zu verbinden. Neben der elektrisch sehr speziellen MIDI-Verbindung gibt es eine Variante von MIDI über USB. Die Arduino-Umgebung bietet dafür die MIDIUSB-Bibliothek an, die über die Bibliotheksverwaltung der IDE direkt installiert werden kann.

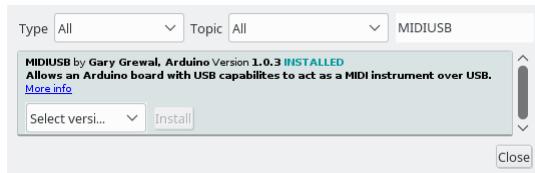


Abbildung 6.52: Installation der MIDIUSB-Bibliothek in der Arduino-IDE

6.16.1 Sketch MidiInstrument

Der **ftDuino**-Beispieldatei unter Datei > Beispiele > FtduinoSimple > MidiInstrument nutzt diese Bibliothek, um den **ftDuino** als MIDI-Gerät für den PC nutzbar zu machen. Treiber für entsprechende Geräte bringen die gängigen Betriebssysteme bereits mit und Windows, Linux und MacOS erkennen einen zum MIDI-Gerät konfigurierten **ftDuino** ohne weitere Treiberinstallation als USB-Audio-Gerät.

Der **ftDuino** ist ein sogenanntes USB-Verbundgerät. Das bedeutet, dass er mehrere USB-Funktionen gleichzeitig umsetzen kann. Im MIDI-Fall bedeutet das, dass er gegenüber dem PC als MIDI-Gerät erscheint und *gleichzeitig* weiterhin über die USB-COM:-Schnittstelle verfügt, was speziell während der Sketchedentwicklung sehr praktisch sein kann.

Ein mit dem **MidiInstrument**-Sketch versehener **ftDuino** wird z.B. von einem Linux-PC mit den gängigen MIDI-Werkzeugen erkannt:

```
$ aplaymidi -l
Port      Client name          Port name
14:0      Midi Through        Midi Through Port-0
24:0      ftDuino             ftDuino MIDI 1

$ aplaymidi -p 24:0 demosong.mid
...
```

Der **ftDuino** wird eine Stimme des Songs auf einem an 02 angeschlossenen Lautsprecher abspielen und gleichzeitig auf dem COM:-Port Informationen über die empfangenen Befehle ausgeben und damit als Basis für eine elektromechanisches Instrument dienen.

Nur wenige MIDI-Dateien lassen sich mit diesem einfachen Setup befriedigend abspielen, weil dieses einfache Beispiel nur monophon ist und nur einen Ton zur Zeit abspielen kann. Mehrstimmige Lieder können nicht abgespielt werden. Diese Beschränkung lässt sich in einem mehrstimmigen mechanischen Musikmodell natürlich aufheben und ergibt sich allein aus der sehr simplen hier verwendeten Art der Tonerzeugung.

Eine monophone Beispieldatei **song.mid** findet sich im Verzeichnis des Sketches.

³²MIDI, Musical Instrument Digital Interface, <https://en.wikipedia.org/wiki/MIDI>

6.17 Der ftDuino am Smartphone

Schwierigkeitsgrad: ★★★★☆

Mit den meisten modernen Android-Smartphones und -Tablets lässt sich der ftDuino über ein passendes Kabel direkt verbinden. Dafür ist ein sogenanntes USB-On-the-Go(USB-OTG)-Kabel notwendig. Für den ftDuino eignet sich das Lindy 31717 gut. Es verfügt an beiden Enden über die passenden Stecker und ist mit 50cm kurz genug, um in einem Modell untergebracht zu werden.



Abbildung 6.53: Android-Demo zur Nutzung des ftDuino am Smartphone

Mit USB-OTG übernimmt das Smartphone die Rolle des PCs. Es beim Anschluss eines entsprechenden Kabels eine Spannung am USB-Anschluss bereit und übernimmt die Steuerung des USB-Bus als aktiver sogenannter USB-Host. Werden die Ausgänge des ftDuino nicht benötigt, so kann auf diese Weise sogar auf einer eigenen Stromversorgung des ftDuino verzichtet werden. Der ftDuino wird dann vom Handy mit Strom versorgt.

Die gesamte Kommunikation zwischen Smartphone und ftDuino läuft über die serielle USB-Verbindung (COM-Port) und wird ftDuino-seitig nicht anders behandelt als die übliche Kommunikation mit dem PC. In einigen Fällen mag es sinnvoll sein, wenn dem ftDuino bekannt ist, ob die USB-Verbindung zum Smartphone besteht oder nicht, wenn z.B. ohne Smartphone eine automatische Funktion ausgeführt werden soll während mit angeschlossenem Smartphone eine manuelle Bedienung erwünscht ist. Das ist im Sketch über die Abfrage der USB-Stromversorgung möglich.

```
// Abfrage der USB-Stromversorgung vorbereiten (z.B. in der setup()-Funktion)
USBCON |= (1<<OTGPADE);

// Abfrage der USB-Stromversorgung
if(USBSTA & (1<<VBUS)) {
    // USB ist verbunden
    // ...
} else {
    // USB ist nicht verbunden
    // ...
}
```

Ein kompletter einfacher Demo-Sketch findet sich unter [Datei > Beispiele > FtduinoSimple > USB > AndroidDemo](#). Er sendet über USB einmal pro Sekunde eine Nachricht ("COUNTER: XX") und erwartet die Nachricht "ON" oder "OFF" und schaltet den Ausgang 01 entsprechend.

Im ftDuino-Repository findet sich die dazu passende Android-App³³. Sie lässt sich im AndroidStudio übersetzen und als

³³ftDuino-Android-App: <https://github.com/harbaum/ftduino/tree/master/android>

Basis für eigene Entwicklungen nutzen. Die Android-App basiert auf der UsbSerial-Bibliothek³⁴ und kann nach minimalen Anpassungen neben dem **ftDuino** auch die meisten Arduinos anbinden.

Die Benutzung ist sehr viel einfacher als die sonst verwendeten Bluetooth- oder WLAN-Verbindungen, da sie keine weitere Konfiguration erfordert. Sobald Smartphone und **ftDuino** verbunden werden startet die entsprechende App und die Verbindung ist vollständig.

6.18 WebUSB: **ftDuino** via Webbrowser steuern

Schwierigkeitsgrad: ★★★★☆

Die übliche Weise, auf USB-Geräte wie den **ftDuino** zuzugreifen folgt einem festen Schema: Auf dem PC werden passenden Treiber installiert, die dem PC mitteilen, wie die Kommunikation mit dem Gerät abzulaufen hat. Eine PC-Anwendung wie die Arduino-IDE nutzt diesen Treiber, um auf das Gerät zuzugreifen.

WebUSB³⁵ ist der Versuch, die Benutzung von USB-Geräten massiv zu vereinfachen, indem auf Treiber- und Softwareinstallation komplett komplett verzichtet wird. Stattdessen bringt eine spezielle Webseite alles mit, um direkt mit einem entsprechend angepassten USB-Gerät zu kommunizieren. Dabei kann das USB-Gerät dem PC mitteilen, unter welcher URL die steuernde Webseite zu finden ist. Für den Anwender ergibt sich so eine echte Plug-'n-Play-Lösung. Nach dem Anstecken eines bisher unbekannten WebUSB-Gerätes öffnet der Browser direkt die passende Webseite und das Gerät kann sofort ohne Treiber- oder Softwareinstallation verwendet werden.

6.18.1 Chrome-Browser

WebUSB ist kein offizieller Web-Standard und wird daher lediglich von Googles Chromebrowser³⁶ unterstützt. Chrome muss für dieses Experiment nicht auf dem PC installiert sein, es reicht, die sogenannte Portable-Version³⁷ z.B. von einem USB-Stick zu starten. Aus Sicherheitsgründen hat Google in aktuellen Versionen die Möglichkeit zum automatischen Start der vom Gerät gemeldeten URL unterbunden. Die URL <https://harbaum.github.io/ftduino/webusb/console> muss daher manuell im Browser angegeben werden.

Der Chrome-Browser ist der von Google mitgelieferte Browser auf Android-Smartphones und -Tablets. Diese Version eignet sich ebenfalls für WebUSB-Experimente. Zum Anschluss des **ftDuino** an das Smartphone wird ein USB-Host-Kabel (z.B. Lindy 31717, siehe Abschnitt 6.17) benötigt.



Abbildung 6.54: Der Chrome-Browser ist auf den meisten Android-Geräten vorinstalliert

Auf Linux-PCs erfüllt den gleichen Zweck der Chromium-Browser. Er lässt sich normalerweise über den Paketmanager nachinstallieren. Im Gegensatz zur Windows-Version funktioniert hier auch das automatische Weiterleiten an die vom USB-Gerät bereitgestellte URL wie in Abbildung 6.55 zu sehen.

Auf Linux-PCs hat der Webbrowser normalerweise keine ausreichenden Rechte, um USB-Geräte direkt ansprechen zu dürfen. Die Installation der udev-Regeln wie in Abschnitt 2.1.4 beschrieben ermöglicht den Zugriff.

6.18.2 WebUSB-Sketches

Einige WebUSB-Beispiel-Sketches werden als Beispiel in der **ftDuino**-Installation der Arduino-IDE unter Datei > Beispiele > WebUSB mitgeliefert.

³⁴UsbSerial für Android: <https://github.com/felHR85/UsbSerial>

³⁵WebUSB: <https://developers.google.com/web/updates/2016/03/access-usb-devices-on-the-web>

³⁶Google-Chrome-Browser: https://www.google.com/intl/de_ALL/chrome/

³⁷Chrome-Portable: https://portableapps.com/apps/internet/google_chrome_portable

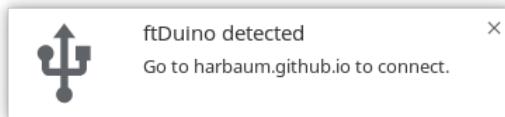


Abbildung 6.55: Meldung beim Eistecken des **ftDuino** bei laufendem Chromium-Browser

Die URL eines WebUSB-Projektes wird im Sketch direkt angegeben und kann in eigenen Sketches entsprechend angepasst werden.

```
WebUSB WebUSBSerial(1 /* https:// */ , "harbaum.github.io/ftduino/webusb/console");
```

Neben dem passenden Sketch verlangt die WebUSB-Spezifikation weitere Anpassungen an der USB-Konfiguration des Geräts. Die nötigen Änderungen nimmt die Arduino-IDE vor, wenn man in der Board-Auswahl den Board-Typ **ftDuino (WebUSB)** wie in Abbildung 6.56 dargestellt auswählt. Diese Einstellung sollte nur für WebUSB verwendet werden, da die Anpassungen nur in Zusammenhang mit der WebUSB-Bibliothek vollständig sind und Windows das Gerät andernfalls nicht erkennt.

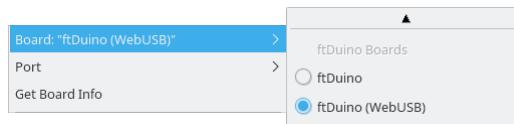
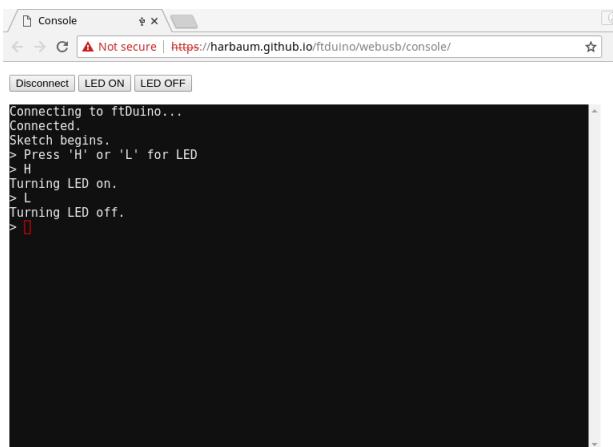


Abbildung 6.56: Auswahl der WebUSB-Konfiguration

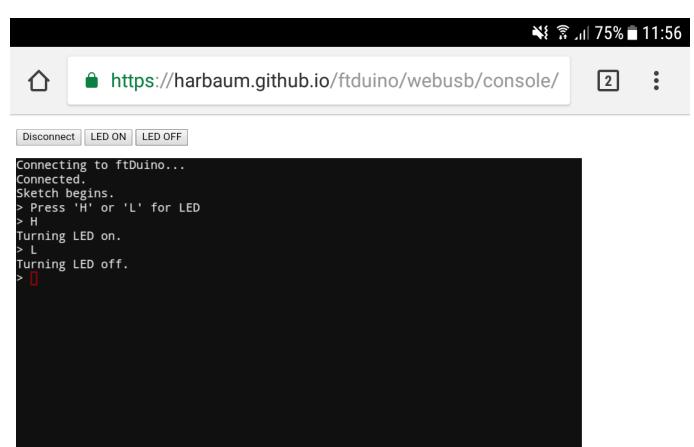
6.18.3 Console

Der **Datei > Beispiele > WebUSB > Console**-Sketch bietet eine einfache Kommandoschnittstelle über USB, mit der die eingebaute Leuchtdiode ein- und ausgeschaltet werden kann.

Ist der Sketch auf dem **ftDuino** installiert, der **ftDuino** an den PC angeschlossen und der Chrome- oder Chromium-Browser geöffnet, so reicht ein Klick auf Connect, um die Verbindung zum Gerät aus dem Browser herzustellen. Die Leuchtdiode kann dann über direkt in der Console eingegebene Befehle gesteuert oder durch Klick auf die Buttons geschaltet werden.



(a) Chromium-Browser unter Linux



(b) Chrome-Browser unter Android

Abbildung 6.57: WebUSB-Console des **ftDuino**

6.18.4 Brickly-lite

Das in Abschnitt 8.3 beschriebene Brickly-Projekt³⁸ hat seinen Ausgangspunkt bei der Community-Firmware für den TXT-Controller. Brickly basiert auf Blockly³⁹, einer grafischen Programmierumgebung zur Nutzung per Webbrowser. Im Falle des TXTs können so per Smartphone, PC oder Tablett mit Hilfe des Webbrowsers Programme erstellt und auf dem TXT laufen gelassen werden.

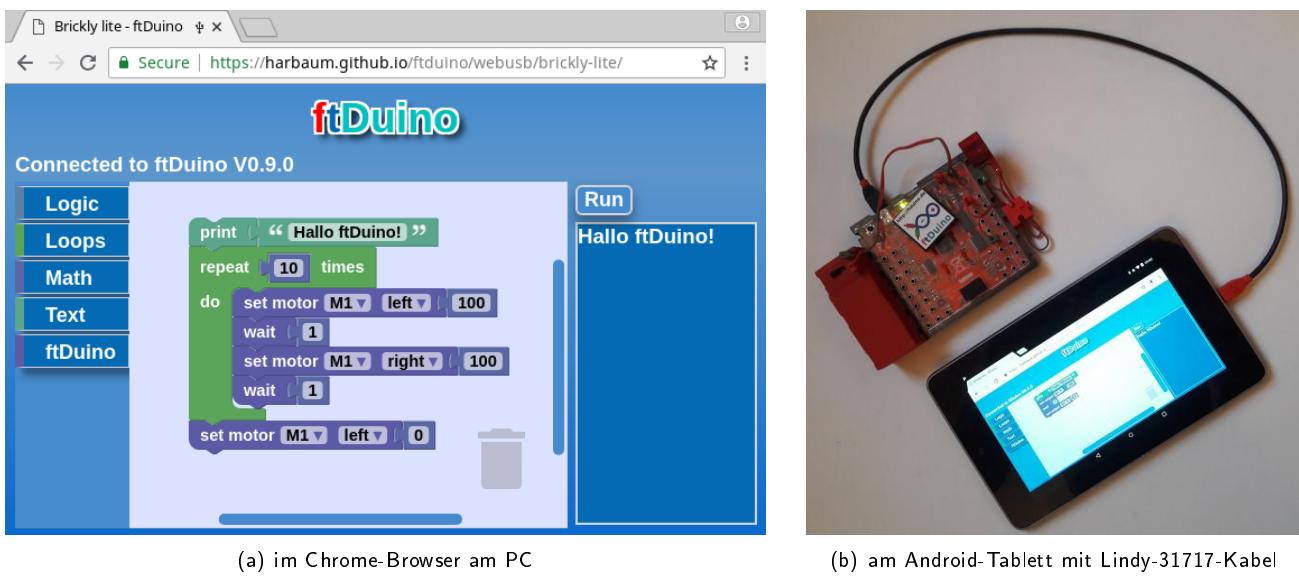


Abbildung 6.58: Brickly-lite für den *ftDuino*

Brickly-lite wurde für den *ftDuino* völlig neu konzipiert. Auf die Ausführung von Blockly-generiertem Code auf dem *ftDuino* wurde dabei verzichtet. Stattdessen werden die Brickly-lite-Programme am Browser erstellt und auch im Browser ausgeführt. Lediglich zur Bedienung der fischertechnik-Sensoren und -Aktoren greift der Browser per USB auf einen angeschlossenen *ftDuino* zurück. Auf dem *ftDuino* muss dabei der Sketch `Datei > Beispiele > WebUSB > IoServer` laufen. Da dieser Sketch mit einem internen OLED-Display (siehe Abschnitt 1.2.7) umgehen kann wird die "Adafruit GFX Library"⁴⁰ zum Übersetzen des Sketches benötigt.

Die Brickly-lite-Webseiten finden sich unter <https://harbaum.github.io/ftduino/webusb/brickly-lite/>. Zur Benutzung muss der *ftDuino* mit installiertem `Datei > Beispiele > WebUSB > IoServer`-Sketch direkt an PC, Smartphone oder Tablett angeschlossen sein. Der Chrome-Browser verbindet sich dann mit dem *ftDuino* und sobald Ein- oder Ausgaben am Modell erfolgen sollen sendet der Browser entsprechende Befehle an den *ftDuino*.

Den Anspruch eines echten "Plug-n-Play"-Erlebnisses kann die Festlegung auf den Chrome-Browser und der fehlende Auto-Start der vom Gerät gesendeten URL unter Windows leider nicht erfüllen. Mit einer vorbereiteten Portable-Installation des passenden Browsers auf einem USB-Stick kann man dennoch auch für Anfänger leicht und ohne Installation zu nutzende Szenarien schaffen, die sich z.B. auf PC-Pools in Schulen einsetzen lassen. Das Beispiel unter `Datei > Beispiele > WebUSB > Console` kann dafür als Ausgangspunkt für Browser-bedienbare einfache Modelle dienen.

Ein ähnliches grafisches Programmiersystem ist "Scratch for Arduino" und "Scatch 3.0". Mehr Informationen finden sich in Abschnitt 8.6 und 6.18.5.

6.18.5 Scratch 3.0

Scratch 3.0 basiert wie Brickly auf dem Blockly-Projekt von Google. Dementsprechend nutzen beide eine sehr ähnliche Art, wer WebUSB aus dem Browser auf dem *ftDuino* zuzugreifen.

³⁸ Brickly für den TXT: <https://cfw.ftcommunity.de/ftcommunity-TXT/de/programming/brickly/>

³⁹ Blockly: <https://developers.google.com/blockly/>

⁴⁰ Adafruit GFX Library: <https://github.com/adafruit/Adafruit-GFX-Library>

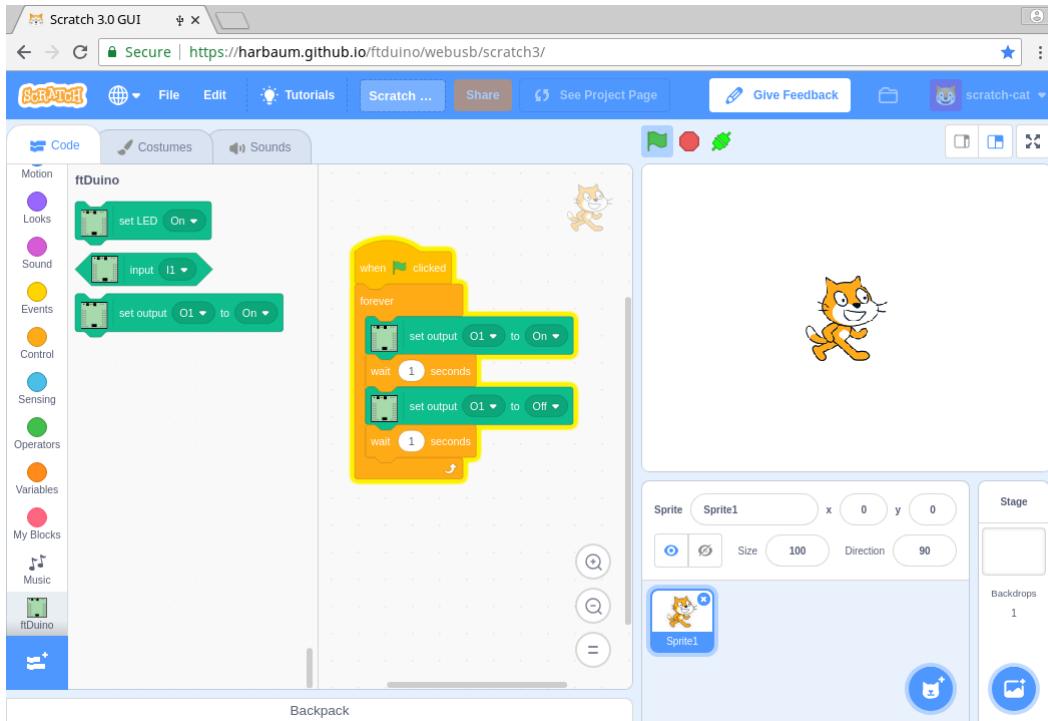


Abbildung 6.59: Scratch 3.0 im Chrome-Browser mit **ftDuino**-Extension

Während Brickly eine komplette **ftDuino**-spezifische Entwicklung ist ist Scratch 3.0 ein eigenständiges Projekt. Die unter <https://harbaum.github.io/ftduino/webusb/scratch3/> befindliche Variante von Scratch 3.0 beinhaltet zusätzlich eine sogenannte Extension zur Ansteuerung des **ftDuino**.

Die **ftDuino**-Extension greift direkt auf den **ftDuino** zu und benötigt daher im Gegensatz zu z.B. den Lego-Extensions keine weitere Software auf dem PC. Damit kann die Extension auf allen Plattformen genutzt werden, die prinzipiell WebUSB unterstützen. Das sind neben den üblichen Windows-, Apple- und Linux-PCs auch die meisten Smartphones und Android-Tablets.

Mehr Informationen zu Scratch 3.0 und dem Einsatz des **ftDuino** finden sich in Abschnitt 5.1.3.

Kapitel 7

Modelle

Während in den Experimenten aus Kapitel 6 der ftDuino-Controller im Mittelpunkt stand und nur wenige externe Komponenten Verwendung fanden geht es in diesem Kapitel um komplexere Modelle. Der ftDuino spielt dabei eine untergeordnete Rolle.

Sämtliche Modelle stammen aus aktuellen Baukästen bzw. sind nah an deren Modelle angelehnt, so dass ein Nachbau mit dem entsprechenden Kasten möglich ist.

7.1 Automation Robots: Hochregallager

Das Modell Hochregallager stammt aus dem Baukasten "Automation Robots". In der Originalanleitung wird der Einsatz des TX-Controllers beschrieben. Ein Zusatzblatt beschreibt den TXT-Controller.

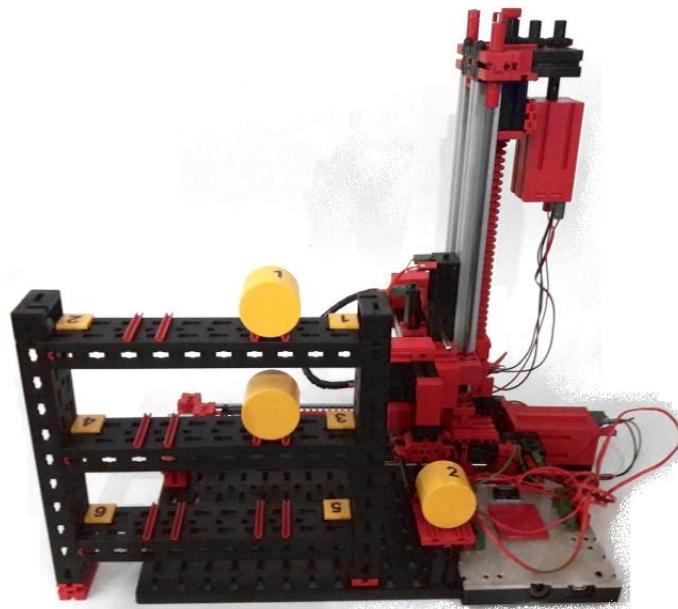


Abbildung 7.1: Hochregal mit ftDuino

Der Beispielsketch `Datei > Beispiele > Ftduino > HighLevelRack` steuert das Modell "Hochregallager" aus dem Baukasten 511933 "ROBO TX Automation Robots". Der Anschluss des ftDuino an das Modell entspricht dabei exakt dem Schaltplan für den TXT.

Die Bedienung erfolgt dabei aus dem seriellen Monitor vom PC aus¹.

¹Hochregal-Video <https://www.youtube.com/watch?v=Sjgv9RnBAbg>

Wichtig: Damit die Befehlseingabe klappt müssen im seriellen Monitor die Zeilenden auf **Neue Zeile** oder **Zeilenumbruch (CR)** eingestellt worden sein, wie im Abschnitt 3.3.1 beschrieben.



Abbildung 7.2: Serielle Kommunikation mit dem Hochregal

7.2 ElectroPneumatic: Flipper

Die Eingänge des **ftDuino** sind auch im Schalter-Modus mit den fischertechnik-Fototransistoren kompatibel. Ein beleuchteter Transistor liefert dann den Wahrheitswert "wahr", ein unbeleuchteter den Wert "unwahr".

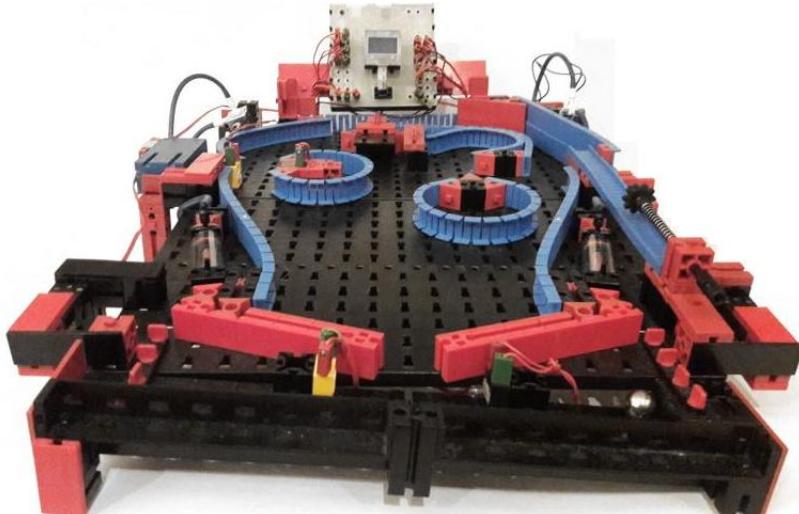


Abbildung 7.3: Flipper auf **ftDuino**-Basis

Der Beispiel-Sketch des Flippers aus dem ElectroPneumatic-Set findet sich unter **Datei > Beispiele > Ftduino > Pinball**. Er nutzt die Fototransistoren als Schalteingänge für die Lichtschranken. Eine durch eine Kugel unterbrochene Lichtschranke liefert dann den Wert "unwahr":

```
if (!ftduino.input_get(Ftduino::I4)) {
    if (millis() - loose_timer > 1000) {
        // ...
    }
    loose_timer = millis();
}
```

Dabei wird ein Timer mitgeführt, der z.B. in diesem Fall dafür sorgt, dass frühestens eine Sekunde (1000 Millisekunden) nach einem Ereignis ein weiteres Ereignis erkannt wird.

Dieser Sketch nutzt ein OLED-Display, um verbliebene Spielbälle und den Punktestand anzuzeigen². Da am **ftDuino** noch Ausgänge frei sind können stattdessen auch Lampen oder Leuchtdioden verwendet werden.

²Flipper-Video <https://www.youtube.com/watch?v=-zmuOhcHRbY>

7.3 ROBOTICS TXT Explorer: Linienfolger

Der mobile Linienfolger ist an die Modelle des "ROBOTICS TXT Explorer"-Sets angelehnt und nutzt den "IR Sparsensor" dieses Sets.

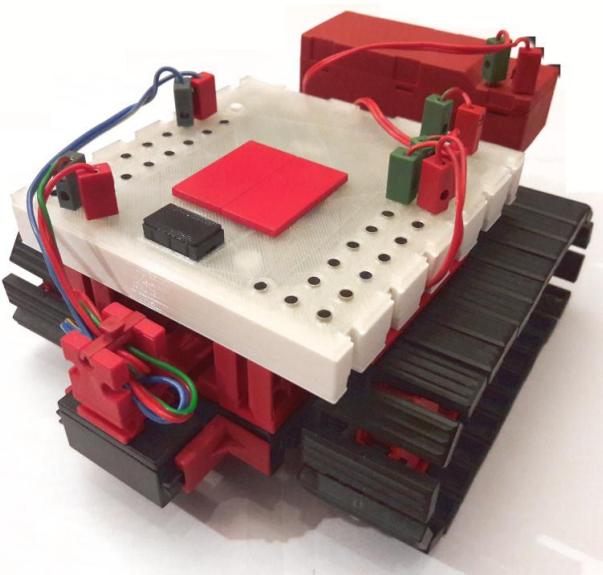


Abbildung 7.4: Ein Linienfolger auf ftDuino-Basis

Ein passender Beispiel Sketch ist unter `Datei > Beispiele > Ftduino > LineSensor` zu finden. Dieser Sketch wertet kontinuierlich den Liniensensor aus, um eine schwarze Linie zu folgen³.

Der Liniensensor wird mit seinen gelben und blauen Kabeln an zwei beliebige der Eingänge I1 bis I8 angeschlossen. Zusätzlich erfolgt über die roten und grünen Kabel die Spannungsversorgung durch den ftDuino.

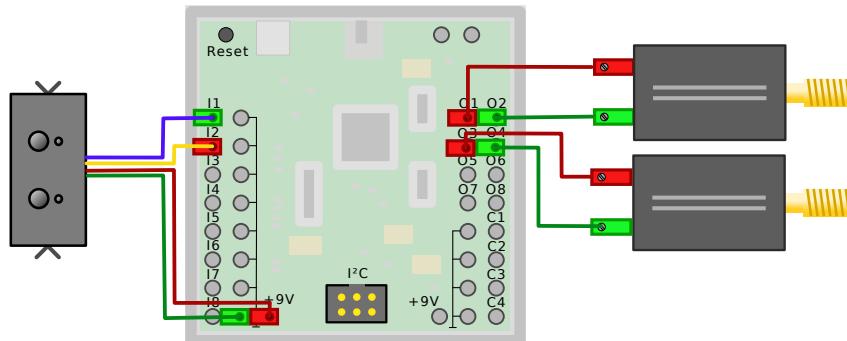


Abbildung 7.5: Verdrahtungsschema des Linienfegers

In diesem Fall ist der Sparsensor an die Eingänge I1 und I2 angeschlossen. Der Sensor liefert nahezu maximale Spannung (circa 9 Volt) wenn eine weiße Fläche erkannt wird und nur wenig Millivolt, wenn die schwarze Linie erkannt wurde.

```
// beiden Eingänge auf Spannungsmessung einstellen
ftduino.input_set_mode(Ftduino::I1, Ftduino::VOLTAGE);
ftduino.input_set_mode(Ftduino::I2, Ftduino::VOLTAGE);

// beide Spannungen auslesen
uint16_t linker_wert = ftduino.input_get(Ftduino::I1);
uint16_t rechter_wert = ftduino.input_get(Ftduino::I2);

// eine Spannung kleiner 1 Volt (1000mV) bedeutet 'Linie erkannt'
```

³Linienfolger-Video <https://www.youtube.com/watch?v=JQ8TLt5MC9k>

```

if((linker_wert < 1000) && (rechter_wert < 1000)) {
    // beide Sensoren haben die Linie erkannt
    // ...
}

```

7.4 Idas Ampel

Ein klassisches Modell ist die Ampel bzw. die Fußgängerampel. Das Modell bildet eine Bedarfssampel mit je drei Lampen für die Autos und zwei für Fußgänger ab.

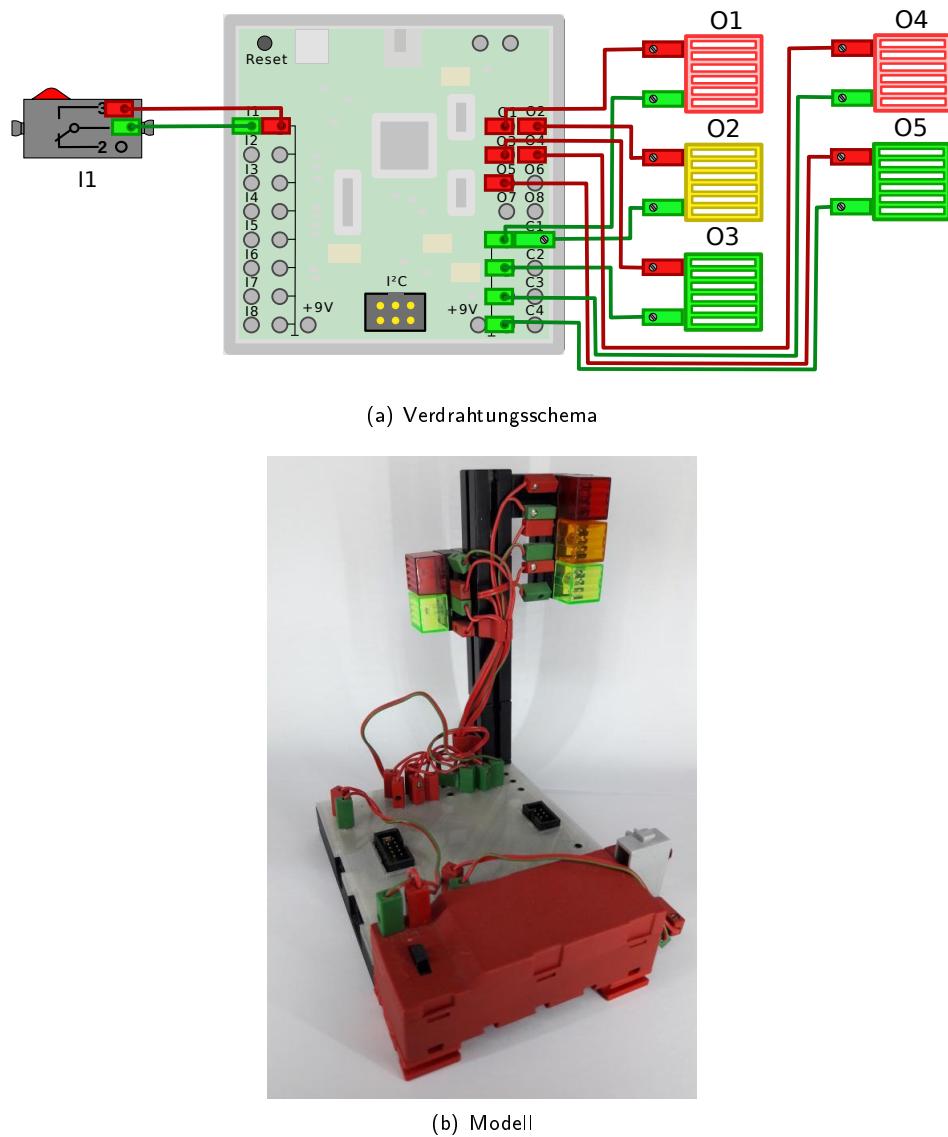


Abbildung 7.6: Idas Ampel

Ein passender Beispiel-Sketch ist unter `Datei > Beispiele > FtduinoSimple > PedestrianLight` zu finden. Er implementiert die Ampel in Form eines Zustandsautomaten. Die Lichtfolge entspricht dabei dem üblichen Ablauf in acht Schritten von "Autos haben grün, Fußgänger rot" über die Grünphase für die Fußgänger bis schließlich die Autos wieder fahren dürfen.

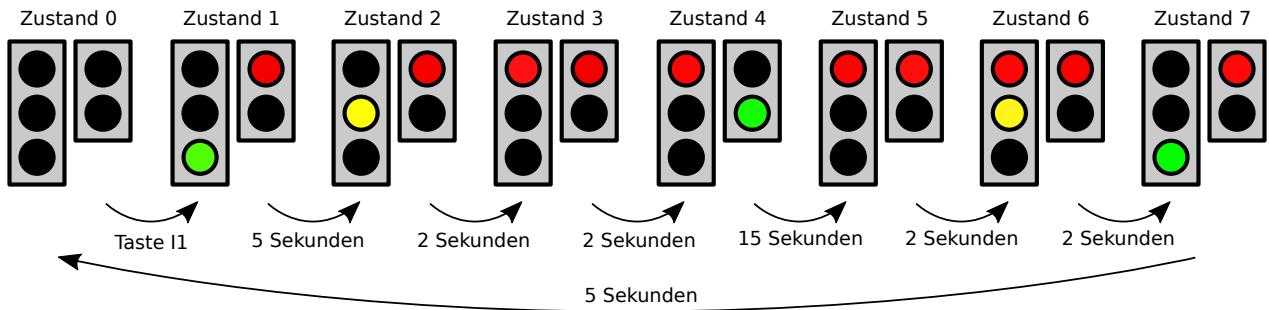


Abbildung 7.7: Die Zustände der Ampel

7.4.1 Zustandsautomaten

Die einfache und naheliegenden Umsetzung der Ampelsteuerung in Software bestünde aus einem Programm, das dem Verlauf der Ampelzustände direkt folgt. Der Programmablauf stoppt, wenn auf den Tastendruck oder auf den Ablauf einer Zeit gewartet wird und setzt fort, wenn das entsprechende Ereignis eingetreten ist. Im Folgenden ist dies exemplarisch für die ersten zwei Zustände der Ampel dargestellt.

```
void loop() {
    // warte auf Tastendruck
    while(!ftduino.input_get(BUTTON)) {
    };

    // Ampel schaltet ein, Autos haben grün, Fußgänger rot
    cars_green();
    pedestrians_red();
    delay(CARS_GREEN_PHASE);

    // Autos bekommen gelb
    cars_yellow();
    delay(YELLOW_PHASE);

    // ...
}
```

Dieses Programm ist kurz und leicht zu verstehen. Das ist eigentlich gut, hat aber einen entscheidenden Nachteil: Während auf ein Ereignis gewartet wird stoppt der gesamte Programmablauf und es ist nicht möglich, weitere Dinge parallel zu erledigen.

Der PedestrianLight-Sketch soll aber beispielsweise nebenbei mit der eingebauten LED des **ftDuino** blinken. Dies soll unterbrechungsfrei passieren und unabhängig davon sein, in welchem Zustand sich die eigentliche Ampel gerade befindet.

Die Lösung ist ein Zustandsautomat.

```
// die loop-Funktion wird immer wieder aufgerufen
void loop() {
    // Zeitpunkt des nächsten Lichtwechsel-Ereignisses
    static unsigned long next_event = 0;
    // Aktueller Zustand der Ampel
    static char state = 0;

    // Die interne Leuchtdiode soll einmal pro Sekunde blinken
    static unsigned long flash_timer = 0;
    if(millis() > flash_timer + 10)
        digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
    if(millis() > flash_timer + 1000) {
        digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
        flash_timer = millis();
    }

    // Teste ob ein Fußgänger im Zustand 0 (Ampel aus) den
    // Knopf gedrückt hat
    if((state == 0) && (ftduino.input_get(BUTTON)))
```

```

state = 1; // ja -> wechsel in Zustand 1

if(state > 0) {

    // Teste, ob die eingestellte Zeit vergangen ist
    if(millis() > next_event) {
        switch(state) {

            // Ampel wechselt in Zustand 1: Autos haben grün, Fußgänger haben rot
            case 1: {
                // schalte Lampen
                cars_green();
                pedestrians_red();
                // setze Zeitpunkt für nächstes Ereignis
                next_event = millis() + CARS_GREEN_PHASE;
                // setze Zustand für nächstes Ereignis
                state++; // Kurzschreibweise für "state = state + 1"
                break;
            }

            // Ampel wechselt in Zustand 2: Autos haben gelb, Fußgänger haben rot
            case 2: {
                cars_yellow();
                next_event = millis() + YELLOW_PHASE;
                state++;
                break;
            }

            // Ampel wechselt in Zustand 3: Autos haben rot, Fußgänger haben rot
            case 3: {
                // ...
                break;
            }

            // ...
        }
    }
}
}

```

Dieses Listing ist deutlich komplizierter. Aber es hat den großen Vorteil, dass an keiner Stelle aktiv gewartet wird. Stattdessen wird die Programmausführung ständig fortgesetzt. Um trotzdem die einzelnen Ampelphasen ablaufen lassen zu können werden zwei Variablen als Speicher angelegt (`next_event` und `state`). Hier wird permanent vermerkt, in welchem Zustand sich die Ampel befindet und wie lange dieser Zustand noch erhalten bleiben soll.

Auf diese Weise ist es möglich, die LED völlig unabhängig blinken zu lassen und ggf. auch weitere Steueraufgaben zu erledigen.

Geschuldet ist der große Aufwand der Tatsache, dass der `ftDuino` über kein eigenes Betriebssystem verfügt, das mehrere Programmteile (sogenannte Prozesse oder Threads) gleichzeitig bedienen könnte, wie es auf PCs und Smartphones z.B. üblich ist.

Der große Vorteil des einfachen `ftDuino`-Ansatzes liegt in der seiner exakten Vorhersagbarkeit. Jeder kennt es vom PC oder Smartphone, wenn das Betriebssystem im Hintergrund unerwartet "beschäftigt" ist und die Programmausführung stockt. Was bei einer Bedienoberfläche nur lästig ist kann bei Steuer- und Regelaufgaben leicht zu einem Problem werden, wenn z.B. ein Motor bei Erreichen einer bestimmten Position nicht schnell genug gestoppt wird. Aus diesem Grund kann der wesentlich einfacheren `ftDuino` auf viele Dinge schneller und vorhersagbarer reagieren als z.B. ein vom Linux-Betriebssystem angetriebener TXT-Controller oder Raspberry-Pi. Ein weiterer positiver Effekt des nicht vorhandenen Betriebssystems ist der schnelle Systemstart. Ein `ftDuino` ist sofort nach dem Einschalten voll funktionsfähig und man muss keinen Betriebssystemstart abwarten, bevor das Gerät seine Aufgaben erfüllen kann.

Der schnelle Systemstart und das leicht vorhersagbare Verhalten sind die Hauptgründe, warum es auch im kommerziellen Umfeld immer einen Bedarf an solch einfachen Systemen wie dem `ftDuino` gibt, auch wenn der Einsatz komplexer, betriebssystembasierter Lösungen mit sinkenden Hardware-Preisen auch in immer einfacheren Geräten möglich wird.

7.5 Klassischer 2D-Plotter

Der fischertechnik-Plotter 30571⁴ von 1985 war eines der ersten Computing-Modelle von fischertechnik. Die Bewegung in X- und Y-Achse wurde von 6-Volt-Schrittmotoren realisiert, der Stift wurde durch einen Magneten gehoben und gesenkt. Die Ansteuerung erfolgte über die acht Ausgänge des damaligen Computing-Interface, wobei der Stift recht trickreich mit einem der Motoren kombiniert wurde, um mit den insgesamt 8 Ausgängen auszukommen.

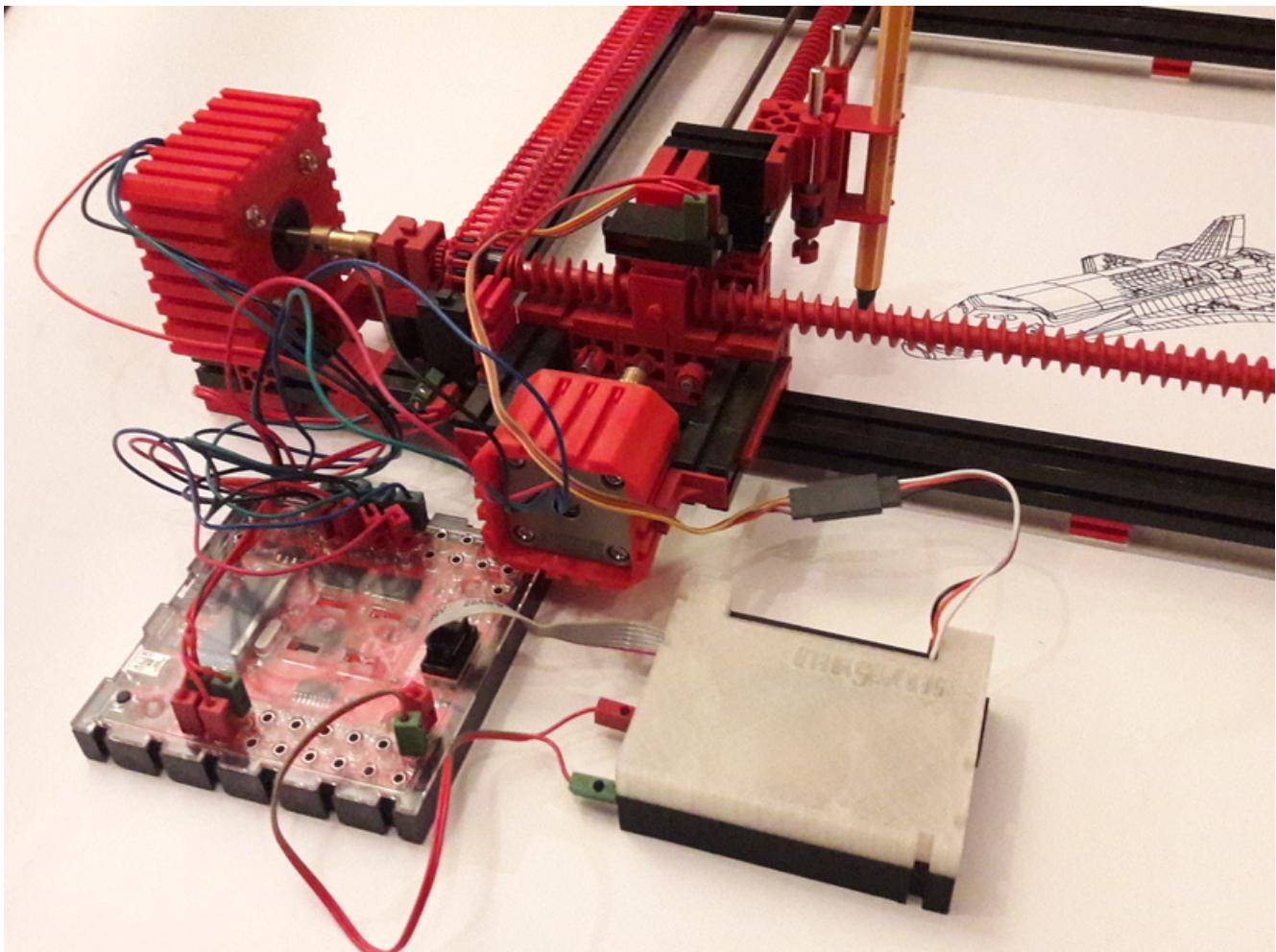


Abbildung 7.8: Der Stift wird von einem fischertechnik-Servo gehoben

Das hier vorgestellte Modell hat die gleichen Maße und verwendet eine sehr ähnliche Grundmechanik. Es werden ebenfalls zwei Schrittmotoren eingesetzt, allerdings 12-Volt-Varianten, die auch an 9 Volt genug Kraft für den Plotterbetrieb entwickeln. Die Schrittmotoren werden wir in Abschnitt 6.4 beschrieben angesteuert und angeschlossen.

Der Stift wird in diesem Modell von einem fischertechnik-Servo gehoben und gesenkt. Dabei könnte der Ansatz aus Abschnitt 6.5 verwendet werden. In diesem Fall wurde stattdessen das I²C-Servo-Shield⁵ verwendet. Es ist etwas unhandlicher, erlaubt aber einen echten I²C-Betrieb und ist so mit dem OLED-**ftDuino** kompatibel.

Der passenden Sketch unter `Datei > Beispiele > FtduinoSimple > Plotter` ist sehr einfach gehalten und hat großes Verbesserungspotenzial. Er akzeptiert auf der USB-/COM-Schnittstelle plotterübliche HP-GL-Kommandos⁶ und kann daher direkt aus vielen PC-Programmen angesprochen werden.

⁴fischertechnik-Datenbank: <https://ft-datenbank.de/tickets?fulltext=30571>

⁵Servo-Shield auf Thingiverse: <https://www.thingiverse.com/thing:3316758>

⁶HP-GL auf Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/Hewlett-Packard_Graphics_Language

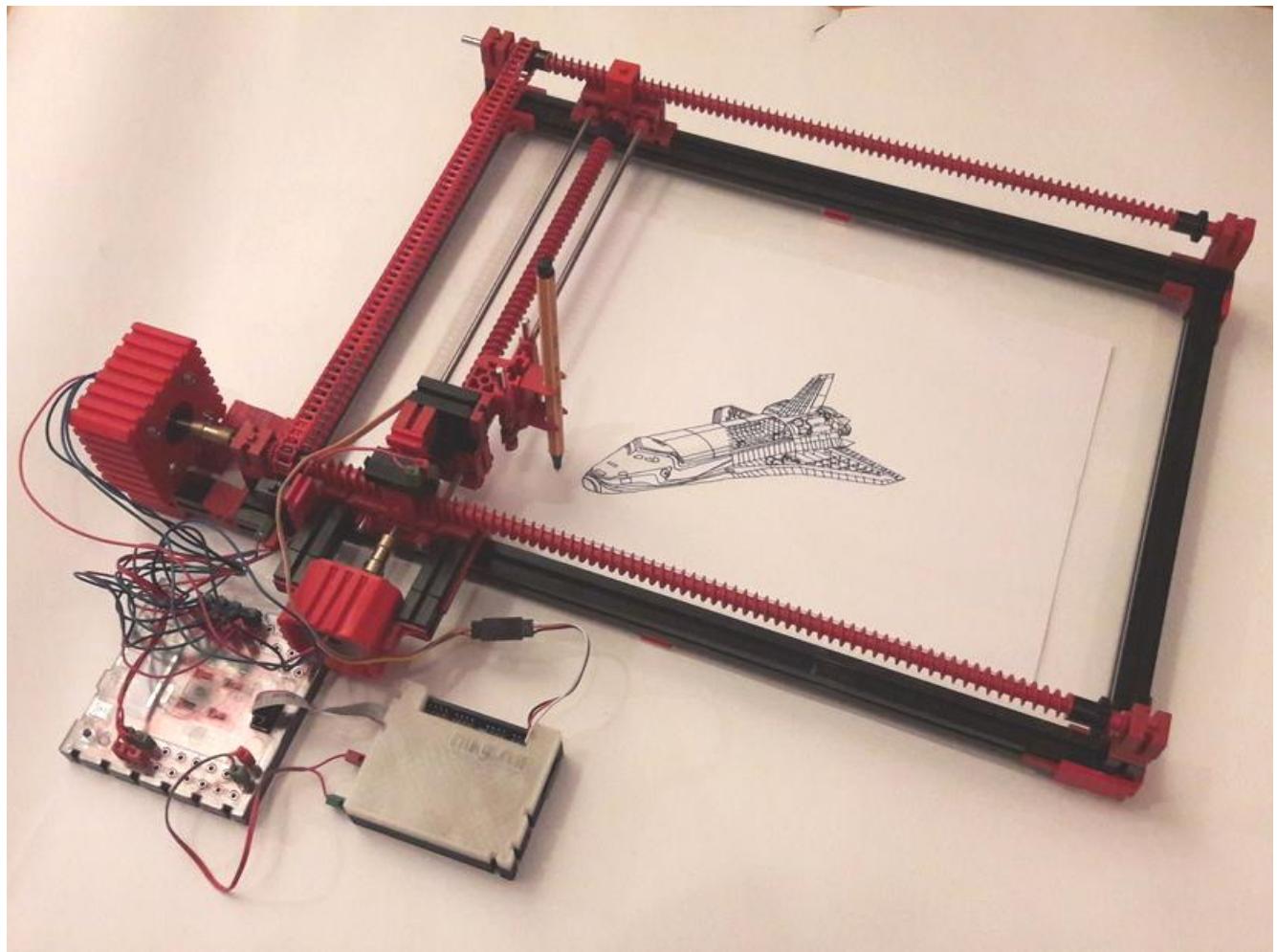


Abbildung 7.9: Das Design orientiert sich stark am Plotter von 1985

Kapitel 8

Community-Projekte

Der **ftDuino** ist ein echtes Community-Projekt. Er basiert auf Ideen aus der fischertechnik-Community und integriert sich entsprechend gut in bestehende Community-Projekte. Während kommerzielle Produkte oft in Konkurrenz mit ihren eigenen Vorgängern stehen und dem Kunden vor allem Neues geboten werden soll können es sich Community-Projekte leichter erlauben, auch ältere und technisch in Konkurrenz stehende Systeme einzubinden.

Der **ftDuino** lässt sich wie in Abschnitt 6.13.5 beschrieben mit dem fischertechnik-TXT-Controller per I²C koppeln. Auf dem TXT kommt dabei die sogenannte Community-Firmware¹ zum Einsatz. Entsprechende Programme zur Anbindung des **ftDuino** per I²C finden sich ebenfalls dort².

8.1 ftduino_direct: **ftDuino**-Anbindung per USB an TXT und TX-Pi

Einfacher und robuster ist die Anbindung per USB an PCs, den TXT oder auch den Raspberry-Pi. Die Community stellt dazu einen Sketch sowie eine passende Python-Bibliothek zur Verfügung³.

Mit Hilfe des Sketches stellt der **ftDuino** seine Anschlüsse einem per USB angeschlossenen übergeordneten Gerät zur Verfügung. Die Python-Bibliothek kann auf dem übergeordneten Gerät genutzt werden, um aus einem Python-Programm auf die Ein- und Ausgänge des **ftDuino** zuzugreifen.



Abbildung 8.1: **ftDuino** per USB am Raspberry-Pi

¹fischertechnik TXT Community-Firmware <http://cfw.ftcommunity.de/ftcommunity-TXT>

²ftDuino I²C für die CFW <https://github.com/harbaum/cfw-apps/tree/master/packages/ftDuinoI2C>

³ftduino_direct-Sketch https://github.com/PeterDhabermehl/ftduino_direct

Mit Hilfe dieser Bibliothek lassen sich bestehende Python-Programme für die Community-Firmware leicht auf die Nutzung eines **ftDuino** erweitern. Besonders interessant ist dies auf Geräten wie dem Raspberry-Pi, da diese von Haus aus keine Schnittstelle zu fischertechnik-Sensoren und -Aktoren mitbringen.

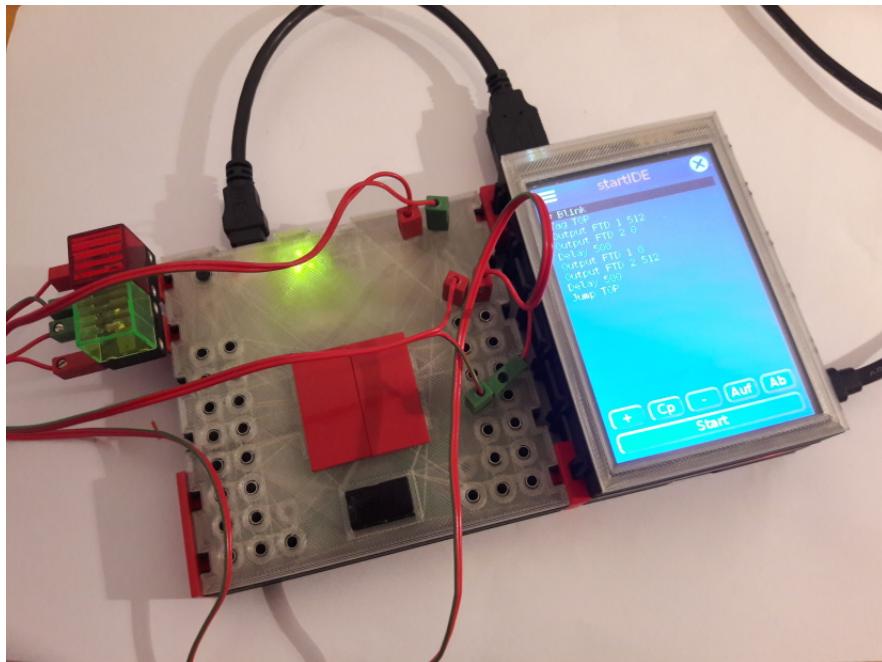


Abbildung 8.2: startIDE auf TX-Pi mit Zugriff auf **ftDuino**

Programme wie **startIDE**⁴ und **Brickly**⁵ können mit Hilfe von **ftduino_direct** auf den **ftDuino** zugreifen und so auf dem Raspberry-Pi die fischertechnik-kompatiblen Anschlüsse des **ftDuino** nutzen.

8.2 ftDuinIO: **ftDuino**-Kontroll-App für TXT und TX-Pi

Die Installation des **ftduino_direct**-Sketches auf dem **ftDuino** kann wie gewohnt per Arduino-IDE erfolgen, benötigt aber einen klassischen PC. Um vom PC komplett unabhängig zu sein wurde die **ftDuinIO**-App für die Community-Firmware entwickelt.



Abbildung 8.3: Die **ftDuinIO**-App

Die App kann auf dem fischertechnik-TXT ebenso betrieben werden wie auf dem zum TX-Pi konfigurierten Raspberry-Pi und erlaubt es, Sketches auf den **ftDuino** zu laden sowie die **ftduino_direct**-Funktionen zu testen.

⁴startIDE: <https://forum.ftcommunity.de/viewtopic.php?f=33&t=4297>

⁵Brickly: <https://cfw.ftcommunity.de/ftcommunity-TXT/de/programming/brickly/>

8.3 Brickly-Plugin: Grafische ftDuino-Programmierung in Brickly

Brickly⁶ ist eine auf Googles Blockly⁷ basierende grafische Programmierumgebung.

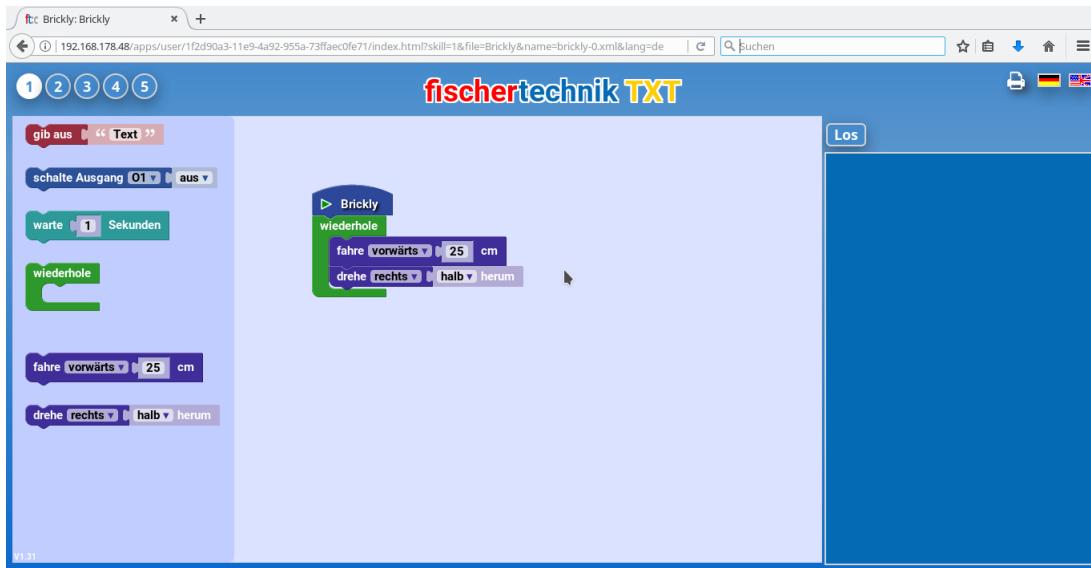


Abbildung 8.4: Die Brickly-Programmieroberfläche

Brickly wurde für den fischertechnik-TXT-Controller geschrieben und bringt alles mit, um dessen Ein- und Ausgänge nutzen zu können. Brickly selbst benötigt einen leistungsfähigen Controller, um darauf zu laufen. Dies kann ein fischertechnik-TXT-Controller oder auch ein Raspberry-Pi sein. Die Bedienung und Programmierung erfolgt dann im Web-Browser mit Hilfe eines per WLAN verbundenen Smartphones oder PCs.

Der ftDuino selbst ist nicht leistungsfähig genug, um Brickly auszuführen. Auch die nötige WLAN-Verbindung bringt der ftDuino nicht mit.

Stattdessen kann Brickly einen an den fischertechnik-TXT-Controller oder einen Raspberry-Pi (TX-Pi) angeschlossenen ftDuino ansteuern. Brickly nutzt dazu die in Abschnitt 8.1 beschriebene `ftduino_direct`-Anbindung.

Das ftDuino-Plugin für Brickly⁸ kann in eine bestehende Brickly-Installation direkt in der Browser-Oberfläche installiert werden.



Abbildung 8.5: Installation eines Brickly-Plugins

Danach können die ftDuino-Ein- und -Ausgänge direkt in Brickly-Programmen verwendet werden. Einem Raspberry-Pi erschließt sich so die fischertechnik-Welt, ein TXT-Controller kann so um 20 zusätzliche Ein- und 8 Ausgänge erweitert werden.

Brickly existiert auch in der in Abschnitt 6.18.4 beschriebenen lite-Variante. Diese erlaubt den direkten Zugriff aus dem Browser auf einen per USB angeschlossenen ftDuino und benötigt keinen zusätzlichen TXT-Controller oder Raspberry-Pi.

⁶Brickly-Anleitung <https://github.com/EsterMi/ft-brickly-userguide/blob/master/de/brickly/index.md>

⁷Google-Blockly <https://developers.google.com/blockly/>

⁸Brickly-ftDuino-Plugin <https://github.com/harbaum/brickly-plugins#ftduino-io—ftduinoxml>

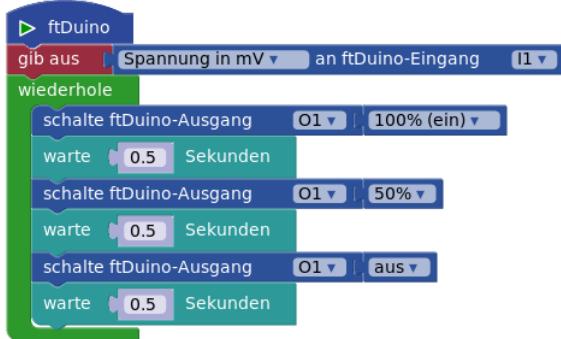


Abbildung 8.6: Ein Brickly-Programm zur Ansteuerung des ftDuino

8.4 startIDE: Programmierung direkt auf dem TX-Pi oder TXT

Die üblichen Programmierumgebung RoboPro für den fischertechnik-TXT- und -TX-Controller benötigt einen Windows-PC zur Programmierung. Selbst das deutlich modernere Brickly (siehe Abschnitt 8.3) ist auf ein externes Gerät zur Programmierung angewiesen.

StartIDE⁹ wurde dagegen so konzipiert, dass schon der kleine Touchbildschirm des fischertechnik-TXT-Controllers oder eines Raspberry-Pi ausreicht, um direkt am Gerät Programme erstellen zu können.

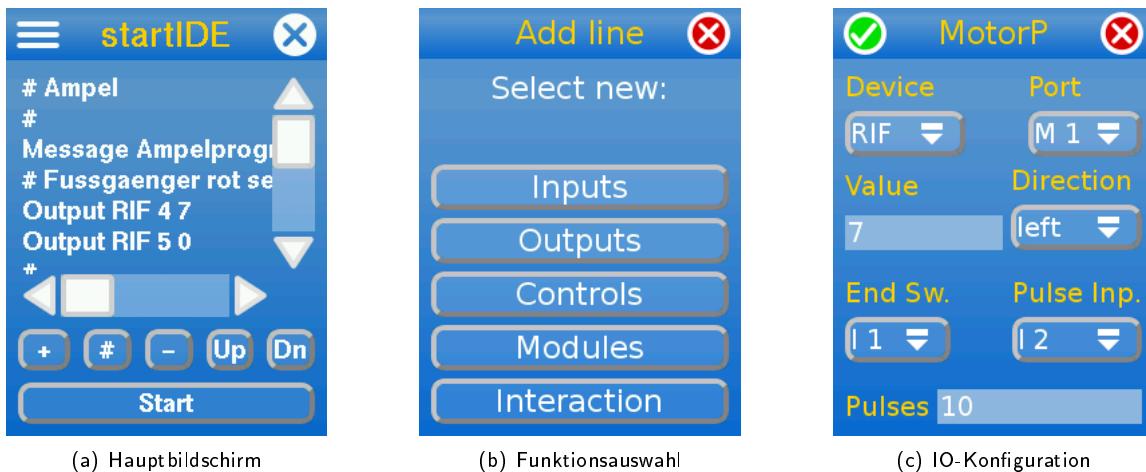


Abbildung 8.7: Die Oberfläche der StartIDE

Die startIDE unterstützt neben den eigenen Anschlüssen des TXT auch die Anschlüsse einer ganzen Reihe per USB extern anzuschließender Interfaces und damit u.a. auch die des ftDuino. Dazu bedient sich startIDE der bereits in Abschnitt 8.1 vorgestellten `ftduino_direct`-Anbindung. Da die startIDE auch auf dem TX-Pi bzw. dem Raspberry-Pi läuft verleiht sie diesem die für den Einsatz im fischertechnik-Modellen nötigen Anschlüsse.

Das Gespann TX-Pi (bzw. Raspberry-Pi), ftDuino und startIDE erlaubt damit, fischertechnik-Modelle ganz ohne PC oder Smartphone zu programmieren.

Die ausführliche Bedienungsanleitung¹⁰ der startIDE enthält weitere Details zur Nutzung des ftDuino.

⁹startIDE-Homepage: <https://github.com/PeterDhabermehl/startIDE/>

¹⁰startIDE-Anleitung: https://github.com/PeterDhabermehl/startIDE/blob/master/ddoc/Manual_160_de.pdf

8.5 ft-Extender: I²C-Erweiterung

Der ft-Extender ist wie der I²C-Expander aus Abschnitt 6.13.6 ein Gerät, das es erlaubt den I²C-Bus des ftDuino zu erweitern und so unterschiedlichste Geräte gleichzeitig anzuschließen und zu koppeln.

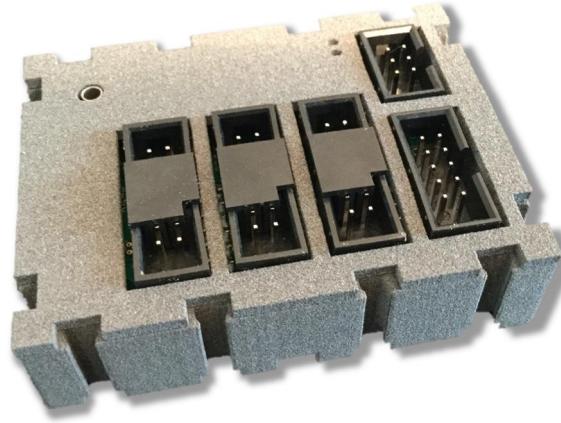


Abbildung 8.8: ft-Extender

Über die Funktionen des I²C-Expander hinaus bietet der ft-Extender eine zusätzliche Spannungsversorgung für angeschlossene Geräte. Mit Hilfe des ft-Extender an den ftDuino angeschlossene Sensoren werden also anders als beim I²C-Expander nicht vom ftDuino versorgt, sondern vom ft-Extender selbst. Dadurch steht einerseits ein etwas höherer Strom zur Verfügung. Vor allem steht aber neben den 5 Volt, die auch der ftDuino liefert, zusätzlich eine 3,3-Volt-Versorgung zur Verfügung. Der ft-Extender ist damit flexibler einsetzbar als der I²C-Expander.

Mehr Informationen zum ft-Extender finden sich unter <https://github.com/elektrofuzzis/ftExtender>, speziell das Handbuch unter https://github.com/elektrofuzzis/ftExtender/blob/master/Handbuch_ft-Extender.pdf.

8.6 Scratch for Arduino (S4A)

Scratch¹¹ ist eine grafische Programmierumgebung vergleichbar mit Blockly und Brickly (siehe Abschnitt 6.18.4).

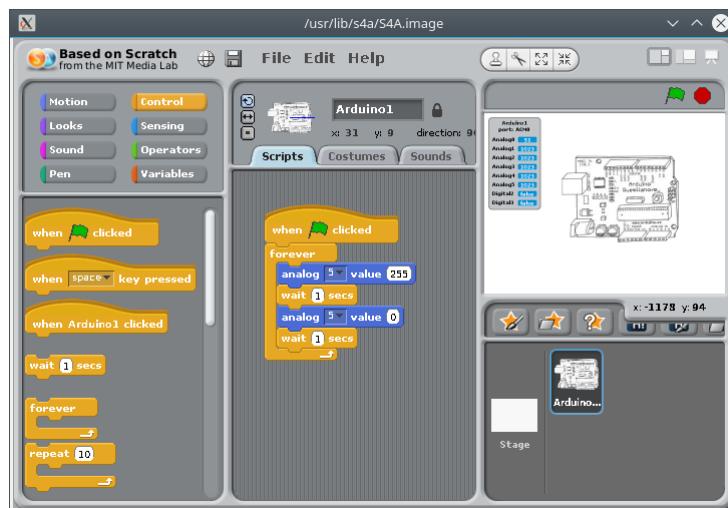


Abbildung 8.9: S4A-Hauptbildschirm

¹¹Scratch: <https://scratch.mit.edu/>

Scratch wurde als reine Simulationsumgebung entwickelt. Die Interaktion mit echter Hardware war nicht vorgesehen. Scratch for Arduino¹² erweitert Scratch im die Möglichkeit, Arduinos anzusprechen. Dazu wird auf dem Arduino ein spezieller Sketch installiert. Der so präparierte Arduino wird von S4A automatisch erkannt und eingebunden.

Da der ftDuino über spezielle Ein- und Ausgänge verfügt lässt er sich nicht direkt mit dem S4A-Sketch ansteuern. Stattdessen findet sich in der ftDuino-Installation ein kompatibler Sketch unter Datei > Beispiele > Ftduino > S4AFirmware16. Ein mit diesem Sketch ausgestatteter ftDuino wird von S4A automatisch erkannt und eingebunden.

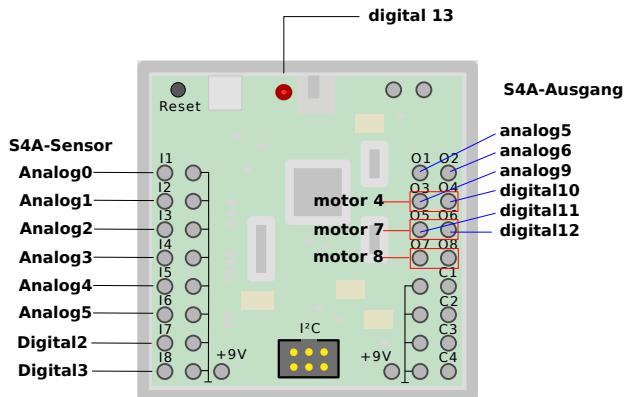


Abbildung 8.10: ftDuino-Anschlüsse unter S4A

Da S4A sich mit den Bezeichnern der Ein- und Ausgänge nah an die üblichen Arduino-Bezeichnungen anlehnt kann nicht mit den ftDuino-üblichen Bezeichnungen gearbeitet werden. Abbildung 8.10 zeigt, welchen Anschlüsse am ftDuino in S4A unter welcher Bezeichnung auftauchen.

8.6.1 Installation

S4A auf dem ftDuino setzt eine normale Installation von S4A voraus. Die Installation ist auf der S4A-Homepage unter <http://s4a.cat/> beschrieben.

Es muss lediglich statt des dort angegebenen Original-Sketches der Datei > Beispiele > Ftduino > S4AFirmware16 - Sketch auf den ftDuino geladen werden.

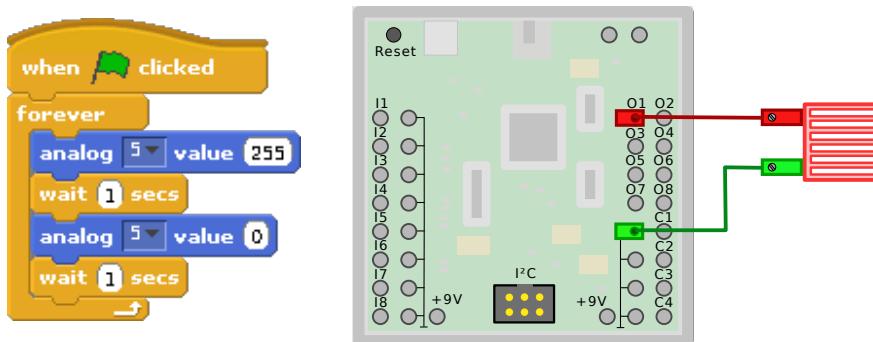


Abbildung 8.11: Einfaches S4A-Beispiel, das eine Lampe blitzen lässt

In Abbildung 8.11 ist ein Beispielprogramm nebst entsprechender Verkabelung abgebildet. Bei den Analogeingängen ist zu beachten, dass der ftDuino einen Wertebereich von 0 bis 65.535 kΩ messen kann während Scratch mit Werten von 0 bis 1023 arbeitet. Ein Wert von 1023 in S4A entspricht dabei 65.535 kΩ bzw. einem offenen Eingang am ftDuino. Ein Wert von 0 in S4A entspricht 0 Ω bzw. einem geschlossenen Eingang.

¹²S4A: <http://s4a.cat/>

8.6.2 Darstellung der Pin-Zuweisungen in S4A

Da S4A für die Benutzung mit einer Arduino entworfen wurde zeigt das Programm zunächst im oberen rechten Bereich die Belegung eines Arduino an. Es erleichtert die Arbeit mit dem ftDuino unter S4A sehr, wenn dort die abweichende Belegung des ftDuino angezeigt wird.

Eine entsprechende sogenannte Sprite-Datei ist unter https://harbaum.github.io/ftduino/www/images/s4a_sprite.png erhältlich. Direkt unter der Anzeige des Arduino-Bildes befindet sich ein Icon zur Auswahl eines neuen Sprites.

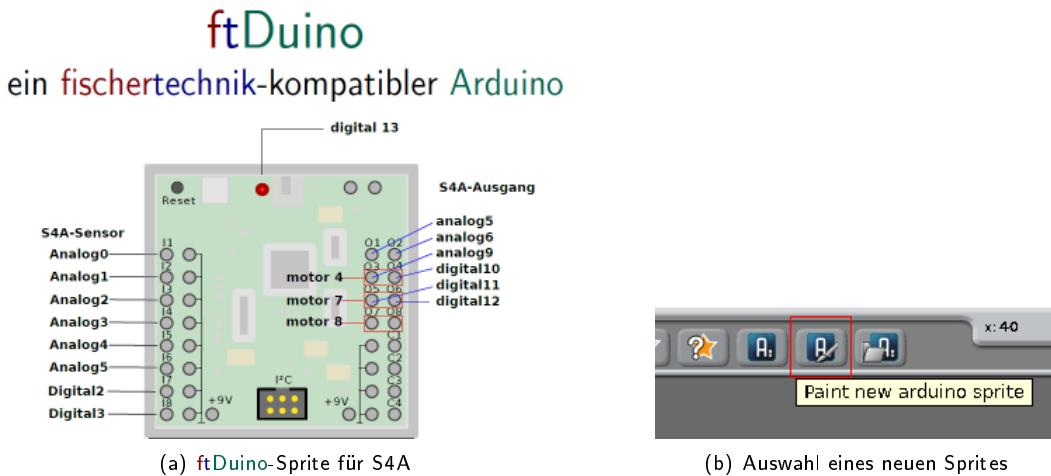


Abbildung 8.12: Installation eines neuen Sprites

Klickt man auf dieses Icon, so kann man im folgenden "Paint"-Dialog ein neues Sprite zeichnen. Um die o.g. Datei zu verwenden muss man diese zunächst auf den eigenen PC laden. Im "Paint"-Dialog kann sie dann über den Import-Knopf in S3A importiert werden. Das neue Sprite-Bild muss abschließend mit "Ok" bestätigt werden.

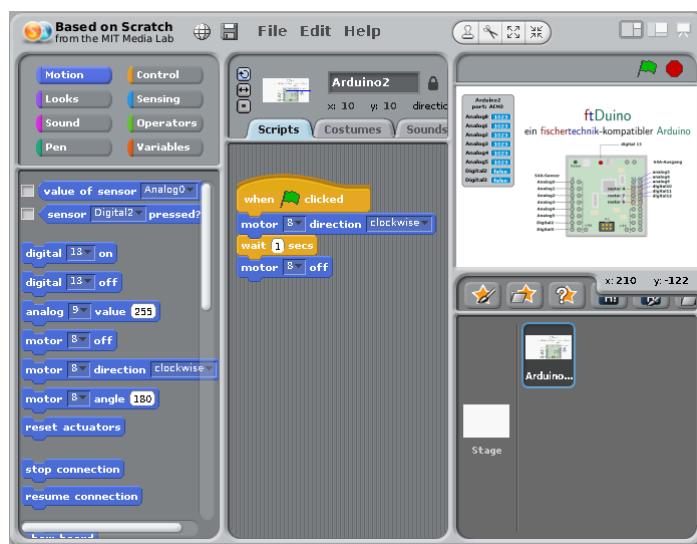


Abbildung 8.13: Anzeige des ftDuino-Sprites in S4A

Die Anschluss-Belegung des ftDuino wird nun für das aktuelle Projekt dauerhaft oben rechts in S4A angezeigt.

8.7 Minecraft und ftDuino: Computerspiel trifft reale Welt

Neben den grafischen Programm-Baukästen wie Scratch, die ihre Ursprünge im didaktischen Bereich haben, gibt es auch grafische Programmiersysteme, die auf den ersten Blick aus einer unerwarteten Richtung kommen.

Ein populäres Beispiel dafür ist Minecraft. Dieses Spiel bietet mit dem "Redstone" und den entsprechenden Komponenten eine Möglichkeit, Kabel in der virtuellen Minecraft-Welt zu verlegen und damit Spiel-interne Aktoren und Sensoren sowie Logikelemente zu verbinden.



Abbildung 8.14: **ftDuino**-Mod in Minecraft

Die Minecraft-Mod für den **ftDuino** erweitert Minecraft um Blöcke, die die Minecraft-interne Welt mit den Anschlüssen eines am PC angeschlossenen **ftDuino** verbindet.

8.7.1 Installation der **ftDuino**-Mod

Die sogenannte **ftDuino**-Mod für Minecraft basiert auf Forge 1.12.2¹³ und setzt eine Installation dieser Minecraft- und Forge-Versionen voraus. Die Installation der **ftDuino**-Mod unterscheidet sich in keiner Weise von anderen Mods.

Die **ftDuino**-Mod selbst kann unter <https://harbaum.github.io/ftduino/minecraft/ftduino-0.0.3.jar> heruntergeladen werden. Sie eignet sich für Windows-, Linux- und MacOS-PCs. Sie wird den üblichen Anleitungen folgend in das entsprechende Mod-Verzeichnis von Minecraft kopiert und beim nächsten Start von Minecraft automatisch geladen.

8.7.2 Vorbereitung des **ftDuino**

Der **ftDuino** muss mit dem IoServer-Sketch versehen werden. Dieser ist in der Arduino-IDE unter **Datei > Beispiele > WebUSB > IoServer** zu finden. In diesem Fall muss als Board der normale **ftDuino** ausgewählt werden und *nicht* **ftDuino (WebUSB)**, da es sich bei Minecraft im keine Web-Anwendung handelt.

Da der IoServer-Sketch bei entsprechend ausgerüsteten **ftDinos** auch das interne OLED-Display nutzt muss die Adafruit-GFX-Bibliothek installiert sein. Dies kann bei Bedarf über das Bibliotheken-Menü der Arduino-IDE mit wenigen Klicks nachgeholt werden. Ein internes Display ist nicht zwingend nötig, der Sketch funktioniert auch auf jedem **ftDuino** ohne Display.

¹³Forge 1.12.2: http://files.minecraftforge.net/maven/net/minecraftforge/forge/index_1.12.2.html

8.7.3 Verwendung des ftDuino in Minecraft

Wurde die ftDuino-Mod erfolgreich eingebunden, dann stehen im Creative-Modus von Minecraft im Redstone-Bereich die in Abbildung 8.15 dargestellten zusätzlichen Blöcke zur Verfügung.

Zur Zeit stehen reine digital-Blöcke für die Eingänge I1 bis I8, die Ausgänge 01 bis 08 und die interne Leuchtdiode des ftDuino zur Verfügung.



Abbildung 8.15: ftDuino-Blöcke in Minecraft

Der Input-Block (IN) stellt eine Verbindung von Redstone zu einem der Eingänge I1 bis I8 des ftDuino zur Verfügung. Durch Rechtsklick auf die Vorderseite des Blocks kann der Eingang ausgewählt werden. Er wird durch einen grünen Stecker symbolisiert, der in einer von acht Buchsen steckt. Ein gelber Blitz rechts daneben zeigt an, wenn der angewählte Eingang aktiv ist weil z.B. ein am ftDuino angeschlossener Schalter geschlossen ist. Der in der Abbildung dargestellte Eingang I1 ist zur Zeit nicht aktiv. Es können mehrere Input-Blöcke mit dem gleichen Eingang des ftDuino assoziiert werden, alle Blöcke empfangen dann gleichzeitig das Signal des entsprechenden Eingangs am ftDuino.

Der Output-Block (OUT) stellt eine Verbindung von Redstone zu einem der Ausgänge 01 bis 08 des ftDuino her. In diesem Fall erfolgt die Kennzeichnung durch einen roten Stecker. Der in der Abbildung dargestellte Block wird durch aktives Redstone angesteuert. Er ist also aktiv und steuert in diesem Fall den Ausgang 02 an und schaltet ihn in den Zustand HI und eine zwischen dem Ausgang 02 und Masse (-) angeschlossene Lampe würde leuchten. Dies wird durch das Blitz-Symbol angezeigt. Es kann immer nur ein Block einem der ftDuino-Ausgänge zugeordnet werden, da andernfalls widersprüchliche Signale an den gleichen Ausgang gesendet werden können.

Der LED-Block steuert die interne Leuchtdiode des ftDuino an. Dieser Block kann nur einmal in der Minecraft-Welt existieren, um wiederum widersprüchlicher Ansteuerung vorzubeugen.

In der Beispielwelt in Abbildung 8.14 ist rechts hinten z.B. ein einfacher Wechselblinker zu sehen. Die Redstone-Fackel an dem mit Ausgang 02 assoziierten ftDuino-Output-Block bildet einen Inverter, der das vorne an diesem Block anliegende Signal negiert. Das Signal wird auf den davor liegenden Redstone-Repeater geführt, der das Signal leicht verzögert und zurück auf den mit Ausgang 02 assoziierten ftDuino-Output-Block leitet. Das kontinuierliche Verzögern und Negieren des Signals führt zu einem Blinken ungefähr im Sekundentakt. Ein weiterer Output-Block, diesmal mit 01 assoziiert, ist mit dem invertierten Signal verbunden. An die Ausgänge 01 und 02 angeschlossene Lampen blinken daher im Wechsel. Weiter links im Bild sind Eingänge über ftDuino-Input-Blöcke realisiert, die unter anderem eine Redstone-Lampe über Eingang I7 des ftDuino ansteuern.

Kapitel 9

Bibliotheken

Mit dem Schaltplan aus Anhang A und entsprechendem Know-How über den verbauten ATmega32U4-Controller lassen sich sämtliche Anschlüsse des **ftDuino** aus einem Arduino-Sketch ansteuern. Allerdings erfordert dieses Vorgehen einiges an Erfahrung und führt zu vergleichsweise komplexen Arduino-Sketches, da sämtlicher Code zur Ansteuerung der diversen Ein- und Ausgänge im Sketch selbst implementiert werden müsste.

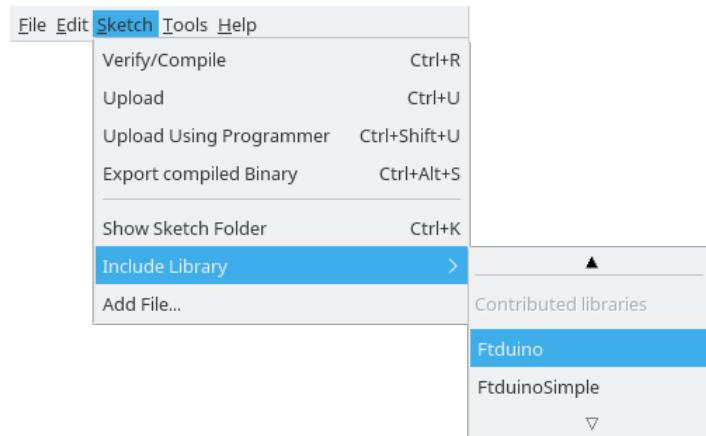


Abbildung 9.1: Die **ftDuino**-Bibliotheken in der Arduino-IDE

Der **ftDuino** bringt daher sogenannte Bibliotheken mit. Das sind Code-Sammlungen, die bereits fertige Routinen zum Ansteuern der Ein- und Ausgänge des **ftDuinos** enthalten. Der eigentliche Arduino-Sketch wird dadurch sehr viel einfacher und kürzer und vor allem muss der Programmierer die Aspekte der Hardware selbst gar nicht komplett verstanden haben, da er lediglich einige einfach zu benutzende Routinen zum Zugriff auf die **ftDuino**-Hardware nutzt. Die Bibliotheken werden als Teil der **ftDuino**-Installation in der Arduino-IDE automatisch mit installiert. Aktualisierungen dieser Bibliotheken werden von der Arduino-IDE automatisch festgestellt und zum Update angeboten.

Trotzdem ist der direkte Zugriff natürlich weiterhin möglich. Der fortgeschrittene Programmierer kann also nach wie vor an allen Bibliotheken vorbei direkt auf die Hardware zugreifen. Der Code der Bibliotheken ist ebenfalls frei verfügbar¹, sodass der Anwender selbst gegebenenfalls Erweiterungen und Verbesserungen vornehmen kann.

Es gibt zwei Bibliotheken, um den **ftDuino** anzusteuern. Die **FtduinoSimple**-Bibliothek, die sehr einfach gehalten ist und nur ein ganz rudimentäres Funktions-Set bereit stellt und die **Ftduino**-Bibliothek, die deutlich komplexer ist und vielfältige Funktionen zur Signaleingabe und Signalausgabe bietet.

9.0.1 Port-Definitionen und Konstanten

Für die unterschiedlichen Ports des **ftDuino** werden in den beiden folgenden Bibliotheken die gleichen Konstanten verwendet. Die acht Eingänge werden beispielsweise durch die Konstanten **Ftduino::I1** bis **Ftduino::I8** beschrieben. Auch wenn sich

¹<https://github.com/harbaum/ftduino/tree/master/ftduino/libraries>

hinter diesen Konstanten die Werte 0 bis 7 verbergen sollte man wenn möglich immer die Konstanten verwenden. Sollte es irgendwann nötig sein, die hinter den Konstanten verborgenen Werte zu ändern, so werden entsprechende Sketche weiterhin funktionieren.

Der Programmierer kann sich aber darauf verlassen, dass diese Konstanten immer direkt aufeinander folgend aufsteigend sind. Man kann also z.B. über alle Ports abzählen:

```
// Schleife über alle Eingänge des ftDuino
for(uint8_t port=Ftduino::I1; port <= Ftduino::I8; port++) {
    /* port verweist nacheinander auf alle Ports I1 bis I8 */
    mache_etwas(port);
}
```

Eine äquivalente Version ist:

```
for(uint8_t i=0; i < 8; i++) {
    mache_etwas(Ftduino::I1+i);
}
```

9.1 FtduinoSimple

Die FtduinoSimple-Bibliothek ist eine sehr einfache Bibliothek. Sie erlaubt nur die Abfrage von einfachen Digitalwerten (an/aus) und das Ein- und Ausschalten von Ausgängen. Es ist mit ihr weder möglich, analoge Spannungen und Widerstände einzulesen, noch die Ausgänge mit variablen Werten zu schalten.

Die Vorteile der FtduinoSimple-Bibliothek sind:

Einfachheit Die Bibliothek bietet nur wenige sehr einfach zu nutzende Funktionen. Man kann kaum etwas falsch machen.

Geringer Speicherbedarf Die Bibliothek belegt kaum Flash- oder RAM-Speicher des **ftDuino**. Fast der gesamte Speicher steht dem eigentlichen Sketch zur Verfügung.

Keine Seiteneffekte Die Bibliothek verwendet keine weitere interne Hardware des ATmega32u4-Controllers und implementiert z.B. keine eigenen Interrupt-Handler. Die gesamte interne Hardware (Timer, Zähler, Interrupts, ...) steht für eigenen Sketche zur Verfügung und man muss mit keinen unerwarteten Effekten rechnen, wenn man direkt auf die ATmega32u4-Hardware zugreift.

Um die FtduinoSimple-Bibliothek zu nutzen muss zu Beginn eines Sketches die entsprechende Include-Zeile eingefügt werden.

```
#include <FtduinoSimple.h>
```

9.1.1 Verwendung im Sketch

Die FtduinoSimple-Bibliothek verbirgt viele Details der Sensor- und Aktoransteuerung vor dem Nutzer und erlaubt es, mit wenigen und einfachen Code-Zeilen die Ein- und Ausgänge in einem Sketch zu verwendet.

Folgendes Beispiel zeigt das periodische Schalten eines Ausgangs mit Hilfe der FtduinoSimple-Bibliothek:

```
1 #include <FtduinoSimple.h>
2
3 void setup() {
4     // keine Initialisierung noetig
5 }
6
7 void loop() {
8     // Ausgang 01 einschalten
9     ftduino.output_set(Ftduino::O1, Ftduino::HI);
10    delay(1000);
11    // Ausgang 01 ausschalten
12    ftduino.output_set(Ftduino::O1, Ftduino::LO);
13    delay(1000);
14 }
```

In den Zeilen 9 und 12 wird der Ausgang 01 des **ftDuino** ein- bzw. ausgeschaltet. Der erste Parameter der `output_set()`-Funktion gibt dabei den zu schaltenden Ausgang an, der zwei bestimmt, ob der Ausgang ein- oder ausgeschaltet werden soll.

Achtung: Um die Ausgänge benutzen zu können muss der **ftDuino** natürlich mit 9 Volt versorgt werden.

Die Eingänge des **ftDuino** lassen sich ebenfalls sehr einfach mit Hilfe der `FtduinoSimple`-Bibliothek abfragen:

```

1 #include <FtduinoSimple.h>
2
3 void setup() {
4     // keine Initialisierung noetig
5 }
6
7 void loop() {
8     // Eingang I1 einlesen
9     if(ftduino.input_get(Ftduino::I1)) {
10        // Ausgang 01 einschalten
11        ftduino.output_set(Ftduino::O1, Ftduino::HI);
12    } else {
13        // Ausgang 01 ausschalten
14        ftduino.output_set(Ftduino::O1, Ftduino::LO);
15    }
16 }
```

In Zeile 9 wird der Zustand eines an den Eingang I1 angeschlossenen Schalters ermittelt. Je nachdem ob er gedrückt (geschlossen) ist oder offen wird in den Zeilen 11 bzw. 14 der Ausgang 01 ein- oder ausgeschaltet.

9.1.2 bool input_get(uint8_t ch)

Diese Funktion liest den Zustand des Eingangs ch ein. Erlaubte Werte für ch sind `Ftduino::I1` bis `Ftduino::I8`. Der Rückgabewert ist `true`, wenn der Eingang mit Masse verbunden ist und `false`, wenn nicht. Auf diese Weise lassen sich z.B. leicht Taster abfragen, die zwischen dem jeweiligen Eingang und den korrespondierenden Masseanschluss daneben geschaltet sind.

Die Auswertung des Eingangs geschieht nicht im Hintergrund, sondern erfolgt genau in dem Moment, in dem die `input_get()`-Funktion aufgerufen wird. Vor allem, wenn dabei ein anderer Port abgefragt wird als im direkt vorhergehenden Aufruf von `input_get()` kommt es dadurch zu einer Verzögerung von einigen Mikrosekunden, da **ftDuino**-intern eine Umschaltung auf den geänderten Eingang durchgeführt werden muss.

Beispiel

```
// lies den Zustand einer Taste an Eingang I1
if(ftduino.input_get(Ftduino::I1)) {
    /* ... tue etwas ... */
}
```

9.1.3 bool counter_get_state(uint8_t ch)

Diese Funktion entspricht von ihrer Wirkungsweise `input_get()`. Allerdings wird `counter_get_state()` auf die Zählereingänge angewandt. Der Wertebereich für ch reicht demnach von `Ftduino::C1` bis `Ftduino::C4`.

Der Rückgabewerte ist `true`, wenn der Eingang mit Masse verbunden ist und `false`, wenn nicht.

Beispiel

```
// lies den Zustand einer Taste an Zaehler-Eingang C1
if(ftduino.counter_get_state(Ftduino::C1)) {
    /* ... tue etwas ... */
}
```

9.1.4 void output_set(uint8_t port, uint8_t mode)

Mit der Funktion `output_set()` können die Ausgänge 01 bis 08 gesteuert werden. Der Wertebereich für `port` reicht daher von `Ftduino::01` bis `Ftduino::08`.

Der Parameter `mode` beschreibt, in welchen Zustand der Ausgang gebracht werden soll. Mögliche Werte für `mode` sind `Ftduino::OFF`, wenn der Ausgang komplett unbeschaltet sein soll, `Ftduino::L0`, wenn der Ausgang gegen Masse geschaltet werden soll und `Ftduino::HI`, wenn der Ausgang auf 9 Volt geschaltet werden soll.

Beispiel

```
// Lampe zwischen Ausgang 01 und Masse leuchten lassen
ftduino.output_set(Ftduino::01, Ftduino::HI);
```

Hinweis: Ausgänge können nur verwendet werden, wenn der ftDuino mit einer 9-Volt-Versorgung verbunden ist (siehe Abschnitt 1.2.5).

9.1.5 void motor_set(uint8_t port, uint8_t mode)

Die Funktion `motor_set()` bedient einen Motorausgang M1 bis M4. Motorausgänge werden durch die Kombination von zwei Ausgängen gebildet (`M1 = 01 und 02, M2 = 03 und 04, ...`). Der Wert für `port` liegt daher im Bereich von `Ftduino::M1` bis `Ftduino::M4`.

Der Parameter `mode` gibt an, welchen Zustand der Motorausgang annehmen soll. Mögliche Werte für `mode` sind `Ftduino::OFF`, wenn der Motor ausgeschaltet sein soll, `Ftduino::LEFT`, wenn der Motor sich nach links drehen soll, `Ftduino::RIGHT`, wenn der Motor sich nach rechts drehen soll und `Ftduino::BRAKE`, wenn der Motor gebremst werden soll.

Der Unterschied zwischen `Ftduino::OFF` und `Ftduino::BRAKE` besteht darin, dass ein noch drehender Motor bei `Ftduino::BRAKE` durch Zusammenschalten der beiden Anschlüsse aktiv gebremst wird während der Motor bei `Ftduino::OFF` lediglich spannungslos geschaltet wird und langsam ausläuft.

Beispiel

```
// Motor an Ausgang M1 links herum laufen lassen
ftduino.motor_set(Ftduino::M1, Ftduino::LEFT);
```

Hinweis: Ausgänge können nur verwendet werden, wenn der ftDuino mit einer 9-Volt-Versorgung verbunden ist (siehe Abschnitt 1.2.5).

9.1.6 Beispiel-Sketches

Code-Beispiele zur Nutzung der `FtduinoSimple`-Bibliothek finden sich im Menü der Arduino-IDE unter `Datei > Beispiele > FtduinoSimple`.

9.2 Ftduino

Die Ftduino-Bibliothek kapselt alle Funktionen der `ftDuino`-Hardware, sodass der Anwender bequemen Zugriff auf alle Ein- und Ausgänge hat, ohne sich über die konkrete technische Umsetzung Gedanken machen zu müssen.

Die Ftduino-Bibliothek benötigt selbst etwas Flash-Speicher, RAM-Speicher und Hintergrund-Rechenleistung, so dass nicht alle Ressourcen komplett dem Anwendungssketch zur Verfügung stehen. Zusätzlich macht sie Gebrauch von internen Ressourcen des ATmega32u4 wie Timern und Interrupts wie jeweils bei den folgenden Funktionsbeschreibungen erwähnt.

Um die Ftduino-Bibliothek zu nutzen muss zu Beginn eines Sketches die entsprechende Include-Zeile eingefügt werden.

```
#include <Ftduino.h>
```

Zusätzlich muss vor Verwendung aller anderen Funktionen die `init()`-Funktion aufgerufen werden. Dies geschieht sinnvoller Weise früh in der `setup()`-Funktion.

```
// die setup-Funktion wird einmal beim Start aufgerufen
void setup() {
    // Benutzung der Ftduino-Bibliothek vorbereiten
    ftduino.init();
}
```

9.2.1 Die Eingänge I1 bis I8

Die Eingänge I1 bis I8 sind mit Analogeingängen des ATmega32u4-Mikrocontrollers im `ftDuino` verbunden. Diese Analogeingänge werden von der `ftDuino`-Bibliothek permanent im Hintergrund ausgewertet, da die Analog-Wandlung eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt und auf diese Weise eine unerwünschte Verzögerung bei der Abfrage von Eingängen vermieden werden kann.

Die `ftDuino`-Bibliothek nutzt dazu den sogenannten ADC_vect-Interrupt. Die Analog-Digital-Wandler (ADCs) werden auf eine Messrate von ungefähr 8900 Messungen pro Sekunde eingestellt. Jeder Eingang wird zweimal abgefragt, um eine stabile zweite Messung zu erhalten, so dass für die 8 Eingänge insgesamt 16 Messungen nötig sind. Daraus ergibt sich eine Konvertierungsrate von circa 560 Messungen pro Sekunde pro Eingang, die automatisch im Hintergrund erfolgen. Beim Auslesen ist der Messwert demnach maximal circa 2 Millisekunden alt und der Wert wird ungefähr alle 2 Millisekunden aktualisiert.

Der `ftDuino` kann einen sogenannte Pull-Up-Widerstand an jedem der Eingänge aktivieren, so dass einer Spannungsmessung eine Widerstandsmessung erfolgen kann. Auch das wird von der `ftDuino`-Bibliothek im Hintergrund verwaltet und die Umschaltung erfolgt automatisch vor der Messung. Sie ist auch der Grund, warum pro Kanal zwei Messungen erfolgen. Dies erlaubt den Signalen, sich nach dem Umschaltvorgang und vor der zweiten Messung zu stabilisieren.

9.2.2 void input_set_mode(uint8_t ch, uint8_t mode)

Die Funktion `input_set_mode()` setzt den Messmodus des Eingangs `ch`. Gültige Werte für `ch` reichen von `Ftduino::I1` bis `Ftduino::I8`.

Der Wert `mode` kann auf `Ftduino::RESISTANCE`, `Ftduino::VOLTAGE` oder `Ftduino::SWITCH` gesetzt werden. Die Funktion `input_get()` liefert in der Folge Widerstandswerte in Ohm, Spannungswerte in Millivolt oder den Schaltzustand eines Schalters als Wahrheitswert.

9.2.3 uint16_t input_get(uint8_t ch)

Diese Funktion liest den aktuellen Messwert des Eingangs `ch` aus. Gültige Werte für `ch` reichen von `Ftduino::I1` bis `Ftduino::I8`.

Der zurückgelieferte Messwert ist ein 16-Bit-Wert. Im Falle einer Spannungsmessung wird ein Wert zwischen 0 und 10.000 zurück geliefert, was einer Spannung von 0 bis 10 Volt entspricht. Im Falle einer Widerstandsmessung wird ein Widerstandswert von 0 bis 65535 Ohm zurück geliefert, wobei der Wert 65535 auch bei allen Widerständen größer 65 Kilohm geliefert wird. Bedingt durch das Messprinzip werden die Werte oberhalb circa 10 Kilohm immer ungenauer. Bei einer Schaltermessung wird nur `true` oder `false` zurück geliefert, je nachdem ob der Eingang mit weniger als 100 Ohm gegen Masse verbunden ist (Schalter geschlossen) oder nicht.

Normalerweise liefert diese Funktion den letzten im Hintergrund ermittelten Messwert sofort zurück. Nur wenn direkt zuvor der Messmodus des Eingangs verändert wurde, dann kann es bis zu 2 Millisekunden dauern, bis die Funktion einen gültigen Messwert zurück liefert. Die Funktion blockiert in dem Fall die Programmausführung so lange.

Beispiel

```
// Widerstand an I1 auswerten
ftduino.input_set_mode(Ftduino::I1, Ftduino::RESISTANCE);
uint16_t widerstand = ftduino.input_get(Ftduino::I1);
```

9.2.4 Die Ausgänge 01 bis 08 und M1 bis M4

Die Ausgänge 01 bis 08 sind acht unabhängige verstärkte Ausgänge zum direkten Anschluss üblicher 9-Volt-Aktoren von fischertechnik wie z.B. Lampen, Ventile und Motoren.

Je vier Ausgänge werden von einem Treiberbaustein vom Typ MC33879A² angesteuert. Dieser Baustein enthält acht unabhängig steuerbare Leistungstransistoren. Je zwei Transistoren können einen Ausgang auf Masse schalten, auf 9 Volt schalten oder ganz unbeschaltet lassen. Daraus ergeben sich die drei möglichen Zustände jedes Ausgangs L0 (auf Masse geschaltet), HI (auf 9 Volt geschaltet) oder OFF (unbeschaltet).

Je zwei Ausgänge Ox können zu einem Motorausgang Mx kombiniert werden. Ausgänge 01 und 02 ergeben den Motorausgang M1, 03 und 04 den Motorausgang M2 und so weiter. Der kombinierte Motorausgang kann die vier möglichen Zustände OFF, LEFT, RIGHT und BRAKE annehmen. In den Zuständen LEFT und RIGHT dreht ein angeschlossener Motor je nach Polarität des Anschlusses links oder rechts-herum. Im Zustand OFF sind beide Ausgänge unbeschaltet und der Motor verhält sich, als wäre er nicht angeschlossen und lässt sich z.B. relativ leicht drehen. Im Zustand BRAKE sind beiden Ausgänge auf Masse geschaltet und ein angeschlossener Motor wird gebremst und lässt sich z.B. schwer drehen.

Die Motortreiber sind über die sogenannte SPI-Schnittstelle des ATmega32u4 angeschlossen. Beide Motortreiber sind in Reihe geschaltet und werden bei jedem SPI-Datentransfer beide mit Daten versorgt. Signaländerungen an den Ausgängen und speziell die PWM-Signalerzeugung (siehe Abschnitt 6.3) zur Erzeugung von Analogsignalen an den Ausgängen erfordern eine kontinuierliche Kommunikation auf dem SPI-Bus im Hintergrund. Dazu implementiert die Ftduino-Bibliothek einen sogenannten SPI-Interrupt-Handler, der permanent im Hintergrund läuft und permanent den Status der Motortreiber aktualisiert.

*Hinweis: Die Ausgänge lassen sich nur nutzen, wenn der **fTDuino** mit einer 9-Volt-Spannungsquelle verbunden ist.*

9.2.5 void output_set(uint8_t port, uint8_t mode, uint8_t pwm)

Diese Funktion schaltet einen Einzelausgang. Gültige Werte für port liegen im Bereich von Ftduino:::01 bis Ftduino:::08.

Der Parameter mode gibt an, in welchen Ausgangsmodus der Ausgang geschaltet werden soll. Erlaubte Werte für mode sind Ftduino:::OFF (Ausgang ist ausgeschaltet), Ftduino:::L0 (Ausgang ist auf Masse geschaltet) und Ftduino:::HI (Ausgang ist auf 9 Volt geschaltet).

Der pwm-Parameter gibt einen Wert für die Pulsweitenmodulation zur Erzeugung von Analogsignalen vor. Der Wert kann von 0 (Ftduino:::OFF) bis 64 (Ftduino:::MAX oder Ftduino:::ON) reichen, wobei 0 für aus und 64 für an steht. Eine am Ausgang angeschlossene Lampe leuchtet bei 0 nicht und bei 64 maximal hell. Zwischenwerte erzeugen entsprechende Zwischenwerte und eine Lampe leuchtet bei einem pwm-Wert von 32 nur mit geringer Helligkeit. Es sollten wenn möglich die Konstanten Ftduino:::OFF, Ftduino:::ON und Ftduino:::MAX herangezogen werden, da diese bei einer Veränderung des PWM-Wertebereichs z.B. in späteren Versionen der Ftduino-Bibliothek leicht angepasst werden können. Zwischenwerte können dazu von den Konstanten abgeleitet werden (z.B. Ftduino:::MAX/2).

Beispiel

```
// Ausgang 02 auf 50% einschalten
ftduino.output_set(Ftduino:::02, Ftduino:::HI, Ftduino:::MAX/2);
```

9.2.6 void motor_set(uint8_t port, uint8_t mode, uint8_t pwm)

Die Funktion **motor_set()** schaltet einen kombinierten Motorausgang. Gültige Werte für port liegen im Bereich von Ftduino:::M1 bis Ftduino:::M4.

Der Parameter mode gibt an, in welchen Ausgangsmodus der Motorausgang geschaltet werden soll. Erlaubte Werte für mode sind Ftduino:::OFF (Ausgang ist ausgeschaltet), Ftduino:::LEFT (Motor dreht links), Ftduino:::RIGHT (Motor dreht rechts) und Ftduino:::BRAKE (Motor wird aktiv gebremst, indem beide Einzelausgänge auf Masse geschaltet werden).

Der pwm-Parameter gibt einen Wert für die Pulsweitenmodulation zur Erzeugung von Analogsignalen vor. Der Wert kann von 0 (Ftduino:::OFF) bis 64 (Ftduino:::MAX oder Ftduino:::ON) reichen, wobei 0 für aus und 64 für an steht. Ein am

²Datenblatt unter http://cache.freescale.com/files/analog/doc/data_sheet/MC33879.pdf.

Ausgang angeschlossener Motor dreht in den Modi Ftdduino::LEFT und Ftdduino::RIGHT bei 0 nicht und bei 64 mit maximaler Drehzahl. Zwischenwerte erzeugen entsprechende Zwischenwerte und ein Motor dreht bei einem pwm-Wert von 32 nur mit geringerer Drehzahl (für Details zum Zusammenhang zwischen Motordrehzahl und PWM-Werte siehe Abschnitt 6.3). Es sollten wenn möglich die Konstanten Ftdduino::OFF, Ftdduino::ON und Ftdduino::MAX herangezogen werden, da diese bei einer Veränderung des PWM-Wertebereichs z.B. in späteren Versionen der Ftdduino-Bibliothek leicht angepasst werden können. Zwischenwerte können dazu von den Konstanten abgeleitet werden (z.B. Ftdduino::MAX/2). Im Modus Ftdduino::BRAKE bestimmt der pwm-Wert, wie stark der Motor gebremst wird. Im Modus Ftdduino::OFF hat der pwm-Wert keine Bedeutung.

Beispiel

```
// Motor an M3 mit 1/3 Geschwindigkeit links drehen
ftduino.motor_set(Ftdduino::M3, Ftdduino::LEFT, Ftdduino::MAX/3);
```

9.2.7 void motor_counter(uint8_t port, uint8_t mode, uint8_t pwm, uint16_t counter)

Diese Funktion dient zur Ansteuerung von Encoder-Motoren und gleicht in ihren ersten drei Parametern der `motor_set()`-Funktion. Die Bedeutung dieser Parameter ist identisch.

Der zusätzliche vierte Parameter gibt an, wie viele Impulse der Encoder-Motor laufen soll. Die Schritte werden auf dem korrespondierenden Zählereingang gemessen, also auf Zählereingang C1 für Motorausgang M1, C2 für M2 und so weiter. Nach Ablauf der angegebenen Impulse wird der Motor gestoppt (siehe `void motor_counter_set_brake()`).

Das Zählen der Impulse und das Stoppen des Motors passieren im Hintergrund und unabhängig von der weiteren Sketchausführung. Die Zahl der pro Motorumdrehung erkannten Impulse hängt vom Motortyp ab. Die Motoren aus dem TXT Discovery Set liefern $63^{1/3}$ Impulse pro Drehung der Motorachse, die Motoren aus den ursprünglich für den TX-Controller verkauften Sets liefern 75 Impulse pro Umdrehung.

9.2.8 bool motor_counter_active(uint8_t port)

Die Funktion `motor_counter_active()` liefert zurück, ob die Impulszählung für den durch `port` spezifizierten Motorausgang aktiv ist. Gültige Werte von `port` liegen im Bereich von Ftdduino::M1 bis Ftdduino::M4.

Aktiv bedeutet, dass der entsprechende Motor durch den Aufruf von `motor_counter()` gestartet wurde und der Impulszähler bisher nicht abgelaufen ist. Mit dieser Funktion kann u.a. auf das Ablauen der Impulszählung und das Stoppen des Motors gewartet werden:

Beispiel

```
// TXT-Encodermotor an M4 für drei volle Umdrehungen starten
ftduino.motor_counter(Ftdduino::M4, Ftdduino::LEFT, Ftdduino::MAX, 190);
// warten bis der Motor stoppt
while(ftduino.motor_counter_active(Ftdduino::M4));
// Motor hat gestoppt
```

9.2.9 void motor_counter_set_brake(uint8_t port, bool on)

Diese Funktion bestimmt das Bremsverhalten des Motors an Ausgang `port`, wenn er durch die Funktion `motor_counter()` gestartet wird.

Wird der Parameter `on` auf wahr (`true`) gesetzt, so wird der Motor nach Ablauf der Zeit aktiv gebremst. Ist er unwahr (`false`), so wird der Motor lediglich abgeschaltet und er läuft ungebremst aus. Die Standardeinstellung nach der Initialisierung der Bibliothek ist wahr, die aktive Bremsung ist also aktiviert.

In beiden Fällen läuft der Motor nach. Im gebremsten Fall läuft ein Encoder-Motor aus dem TXT-Discovery-Set unbelastet circa 5 Impulse nach (circa $1/10$ Umdrehung bzw. $28,5^\circ$). Im ungebremsten Fall läuft der gleiche Motor circa 90 Impulse (circa $1\frac{1}{2}$ Umdrehungen) nach.

Da die Zähler nach dem Stoppen des Encoders weiterlaufen ist der Nachlauf auch per Programm messbar:

Beispiel

```
// Bremse für Ausgang M4 abschalten
ftduino.motor_counter_set_brake(Ftduino::M4, false);
// TXT-Encodermotor an M4 für drei volle Umdrehungen starten
ftduino.motor_counter(Ftduino::M4, Ftduino::LEFT, Ftduino::MAX, 190);
// warten bis der Motor stoppt
while(ftduino.motor_counter_active(Ftduino::M4));
// etwas länger warten, um dem Motor Zeit zum Nachlaufen zu geben
delay(500);
// Zählerstand ausgeben
Serial.println(ftduino.counter_get(Ftduino::C4));
```

9.2.10 Die Zählereingänge C1 bis C4

Die Zählereingänge arbeiten im Gegensatz zu den Analogeingängen rein digital. Sie unterscheiden nur, ob der jeweilige Eingang auf Masse geschaltet ist oder nicht. Dies geschieht üblicherweise durch einen Tester, der zwischen dem Zählereingang und seinem korrespondierenden Masseanschluss angeschlossen ist oder einem Encodermotor, dessen Coderausgang mit dem Zählereingang verbunden ist. Die Zählereingänge haben interne Pull-Up-Widerstände. Das bedeutet, dass sie vom **ftDuino** als "high" bzw mit hohem Signalpegel erkannt werden, wenn kein Signal anliegt weil z.B. ein angeschlossener Taster nicht gedrückt ist. Ist der Taster geschlossen, dann schaltet er den Eingang auf Masse, was von **ftDuino** als "low" erkannt wird.

Die vier Zählereingänge sind direkt mit einem Interrupt-fähigen Eingang am ATmega32u4 verbunden. Technisch ist damit eine Reaktion im Bereich von mehreren hunderttausend Zählimpulsen pro Sekunde möglich. Werden aber z.B. Tastendrücke gezählt, so wird das unvermeidliche Prellen (siehe Abschnitt 6.12) zu verfälschten Ergebnissen führen. Aus diesem Grund führt die Ftduino-Bibliothek im Hintergrund eine Filterung durch und begrenzt die minimale Ereignislänge auf eine Millisekunde. Kürzere Ereignisse werden nicht gezählt.

Nach Systemstart sind alle vier Zähler auf Null gesetzt und deaktiviert. Ereignisse an den Eingängen verändern die Zähler also nicht.

Zusätzlich erlaubt der Zählereingang C1 den Anschluss des fischertechnik ROBO TX Ultraschall-Distanzsensors 133009 wie in Abschnitt 1.2.6 dargestellt.

9.2.11 void counter_set_mode(uint8_t ch, uint8_t mode)

Diese Funktion setzt den Betriebsmodus eines Zählereingangs. Gültige Werte für ch reichen von Ftduino::C1 bis Ftduino::C4.

Wird der mode-Wert auf auf Ftduino::C_EDGE_NONE gesetzt, dann werden keine Signalwechsel gezählt und der Zähler ist deaktiviert. Dies ist der Startzustand.

Wird mode auf Ftduino::C_EDGE_RISING gesetzt, so werden steigende Signalfanken, also Wechsel des Eingangssignals von Masse auf eine höhere Spannung, gezählt. Dies passiert z.B. wenn ein angeschlossener Taster losgelassen (geöffnet) wird.

Ein mode-Wert von Ftduino::C_EDGE_FALLING führt dazu, dass fallende Signalfanken, also Wechsel des Eingangssignals von einer höheren Spannung auf Masse, gezählt werden, was z.B. dann geschieht, wenn ein angeschlossener Taster gedrückt (geschlossen) wird.

Wird der mode-Wert schließlich auf Ftduino::C_EDGE_ANY gesetzt, so führen beide Signaländerungsrichtungen dazu, dass der Zähler erhöht wird. Sowohl das Drücken, als auch das Loslassen einen Testers wird dann z.B. gezählt.

9.2.12 uint16_t counter_get(uint8_t ch)

Diese Funktion liefert den aktuellen Zählerstand zurück. Gültige Werte für ch liegen im Bereich von Ftduino::C1 und Ftduino::C4.

Der maximale Wert, der zurück geliefert wird ist 65535. Wird dieser Wert überschritten, dann springt der Zähler wieder auf 0 zurück.

9.2.13 void counter_clear(uint8_t ch)

Mit Hilfe der Funktion `counter_clear()` kann der Zählerstand auf Null gesetzt werden. Gültige Werte für `ch` liegen im Bereich von `Ftduino::C1` und `Ftduino::C4`.

Beispiel

```
// Eine Sekunde lang steigende (low-nach-high) Impulse an Eingang C1 zählen
ftduino.counter_set_mode(Ftduino::C1, Ftduino::C_EDGE_RISING);
ftduino.counter_clear(Ftduino::C1);
delay(1000);
uint16_t impulse = ftduino.counter_get(Ftduino::C1);
```

9.2.14 bool counter_get_state(uint8_t ch)

Der Zustand der Zählereingänge kann auch direkt mit der Funktion `counter_get_state()` abgefragt werden. Die Werte für `ch` müssen im Bereich von `Ftduino::C1` bis `Ftduino::C4` liegen.

Diese Funktion liefert wahr (`true`) zurück, wenn der Eingang mit Masse verbunden ist und unwahr (`false`) wenn er offen ist.

Es findet bei dieser Funktion keine Filterung statt, so dass z.B. Tastenprellen nicht unterdrückt wird. Es können auf diese Weise digitale Signale mit einer sehr hohen Frequenz erfasst werden.

9.2.15 void ultrasonic_enable(bool ena)

An Zählereingang C1 kann alternativ der fischertechnik ROBO TX Ultraschall-Distanzsensors 133009 wie in Abschnitt 1.2.6 dargestellt betrieben werden. Die Funktion `ultrasonic_enable()` aktiviert die Unterstützung für den Sensor, wenn der Parameter `ena` auf wahr (`true`) gesetzt wird und deaktiviert sie, wenn er auf unwahr (`false`) gesetzt wird.

Wird die Unterstützung für den Ultraschallsensor aktiviert, so wird die Zählfunktion des Eingangs C1 automatisch deaktiviert.

Ist der Ultraschallsensor aktiviert, so wird er kontinuierlich circa zweimal je Sekunde im Hintergrund ausgewertet. Der jeweils aktuelle Messwert ist daher maximal 500 Millisekunden alt.

9.2.16 int16_t ultrasonic_get()

Die Funktion `ultrasonic_get()` liefert den Messwert eines an Zählereingang C1 angeschlossenen Distanzsensors in Zentimetern zurück. Wurde seit Aktivierung kein gültiger Messwert vom Sensor empfangen, so wird als Distanz -1 zurück geliefert. Dies geschieht auch, wenn kein Sensor angeschlossen ist.

Der Sensor selbst arbeitet im Bereich von 0 bis 1023 Zentimeter.

Beispiel

```
// Distanzsensor an Eingang C1 abfragen
ftduino.ultrasonic_enable(true);
delay(1000); // eine Sekunde Zeit für erste Messung geben
int16_t distanz = ftduino.ultrasonic_get();
```

9.3 Befehlsübersicht

Befehlsübersicht FtduinoSimple

Befehl	Beschreibung
bool input_get(uint8_t ch)	Einlesen eines Digitaleingangs I1-I8
bool counter_get_state(uint8_t ch)	Einlesen eines Zählereingangszustands C1-C4
void output_set(uint8_t port, uint8_t mode)	Schalten eines Einzelausgangs O1-08
void motor_set(uint8_t port, uint8_t mode)	Schalten eines Motorausgangs M1-M4

Befehlsübersicht Ftduino

Befehl	Beschreibung
void input_set_mode(uint8_t ch, uint8_t mode)	Setzen eines Eingangsmodus I1-I8
uint16_t input_get(uint8_t ch)	Einlesen eines Eingangs I1-I8
void output_set(uint8_t port, uint8_t mode, uint8_t pwm)	Schalten eines Ausgangs O1-08
void motor_set(uint8_t port, uint8_t mode, uint8_t pwm)	Schalten eines Motorausgangs M1-M4
void motor_counter(uint8_t port, uint8_t mode, uint8_t pwm, uint16_t counter)	Schalten eines Encodermotors M1-M4
bool motor_counter_active(uint8_t port)	Auswerten eines Encodermotorzählers C1-C4
void motor_counter_set_brake(uint8_t port, bool on)	Setzen der Encodermotorbremse M1-M4
void counter_set_mode(uint8_t ch, uint8_t mode)	Setzen eines Zählermodus C1-C4
bool counter_get_state(uint8_t ch)	Einlesen eines Zählereingangszustands C1-C4
void ultrasonic_enable(bool ena)	Aktivieren eines Ultraschallsensors
int16_t ultrasonic_get()	Einlesen eines Ultraschallsensors

Kapitel 10

Selbstbau

Es ist möglich, einen **ftDuino** manuell zu bauen. Die ersten Prototypen sind so entstanden. Bei manuellem Aufbau bietet es sich an, funktionsgruppenweise vorzugehen und jeweils die Funktionsfähigkeit schrittweise sicher zu stellen.

Basis für den Selbstbau ist die industriell gefertigte Platine aus den Anhängen B und C basierend auf dem Schaltplan entsprechend Anhang A.

10.1 Erste Baustufe „Spannungsversorgung“

Im ersten Schritt wird die Spannungsversorgung aufgebaut. Sie besteht aus den Kondensatoren C6 bis C11 sowie C14, den Dioden D1 und D3 bis D5 sowie dem Spannungsregler U2 und der Sicherung F1. Die Spannungsversorungs-Leuchtdiode (siehe Abschnitt 1.2.4) LED2 mit zugehörigem Vorwiderstand R35 werden ebenfalls montiert. Die Spule L1 sowie der Kondensator C1 können auch bereits installiert werden.

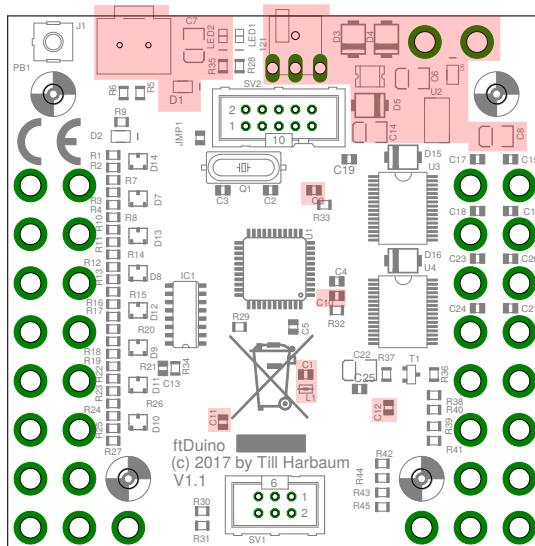


Abbildung 10.1: Komponenten der Spannungsversorgung

Die 9V-Steckbuchse 121 sowie die beiden Bundhülsen 9VIN+ und 9VIN- und die USB-Buchse J1 werden ebenfalls jetzt schon bestückt.

10.1.1 Bauteile-Polarität

Bei folgenden Bauteilen ist auf die Polarität zu achten: D1 und D3 bis D5, C6 bis C8 und C14 sowie LED2.

Der positive Anschluss der Kondensatoren ist durch einen aufgedruckten Balken oder Streifen gekennzeichnet. Im Bestückungsplan ist dieser Anschluss ebenfalls durch einen Balken und zusätzlich durch abgeschrägte Ecken markiert.

Die verschiedenen Dioden des **ftDuino** nutzen unterschiedliche Symbole beim Bestückungsdruck. Aber auch hier ist sowohl auf der Diode selbst als auch auf dem Bestückungssymbol ein Balken auf der Seite der Kathode vorhanden.

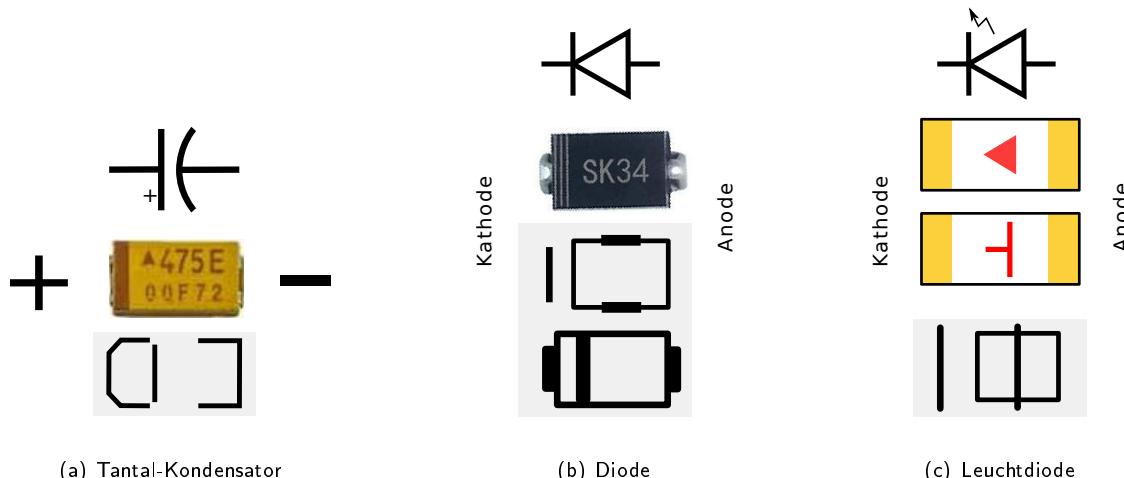


Abbildung 10.2: Schaltplansymbol, Bauteilepolarität und Bestückungssymbol

Bei den Leuchtdioden (LEDs) ist es etwas schwieriger, die korrekte Polarität zu bestimmen. Auf der Unterseite der LED ist üblicherweise ein Dreieck oder ein „T“ aufgedruckt, das jeweils in Richtung Kathode weist.

Die Polarität von Leuchtdioden kann man mit einem einfachen Multimeter im Dioden-Test-Modus überprüfen. Bringt man die Anode der LED mit dem roten Multimeterkabel und die Kathode mit dem schwarzen Kabel in Kontakt, so leuchtet die LED schwach.

Sind alle Komponenten der Spannungsversorgung bestückt, dann sollte die grüne LED leuchten, sobald der USB-Stecker eingesteckt wird oder sobald 9 Volt über die Bundhülsen oder den 9-V-Rundstecker eingespeist werden.

Leuchtet die LED in mindestens einem der Fälle nicht, so kann man mit Hilfe eines Multimeters leicht verfolgen, wo die Spannung noch vorhanden ist und wo nicht mehr. Wahrscheinlichste Fehler liegen in der Polarität der Dioden oder der LED.

10.1.2 Kontrollmessungen

Bei einer 9-Volt-Versorgung muss an den zwischen Pin 1 und 2 des I²C-Anschlusses am noch unbestückten Wannenstecker SV1 eine Spannung von 5 Volt ($\pm 0,4$ Volt) messbar sein. Auf keinen Fall darf mit der Bestückung des Mikrocontrollers fortgefahrene werden, wenn hier eine deutlich zu hohe Spannung gemessen wird.

Ebenfalls bei einer Versorgung aus einer 9-Volt-Quelle sollten an den bisher unbestückten beiden unteren 9-Volt-Ausgängen nahezu 9 Volt zu messen sein. Etwas Spannungsverlust gegenüber der Quelle tritt durch die Dioden D3 bzw. D4 und der Diode D5 auf.

Zwischen den Pads 14 und 7 am bisher unbestückten IC1 muss bei reiner USB-Versorgung eine Spannung von etwas unter 5 Volt zu messen sein. Ist das nicht der Fall, dann besitzt der Spannungsregler U2 keine sogenannte Body-Diode (der empfohlene MCP 1755S hat diese) und die Funktion dieser Diode muss durch D6 extern nachgerüstet werden. Bei Verwendung des empfohlenen MCP 1755S kann D6 ersatzlos entfallen.

Die Diode D5 verhindert, dass der Strom über die Body-Diode zu den Ausgangstreiber des **ftDuino** gelangt. Andernfalls würden die Ausgänge des **ftDuino** auch aus einer USB-5-Volt-Versorgung gespeist, was gegebenenfalls eine Überlastung des USB und/oder der Body-Diode zur Folge hätte.

10.2 Zweite Baustufe „Mikrocontroller“

Ist die Spannungsversorgung sichergestellt und vor allem liegen auch im 9-Volt-Betrieb am I²C-Anschluss stabile 5 Volt an, dann kann mit dem Mikrocontroller U1 fortgefahren werden.

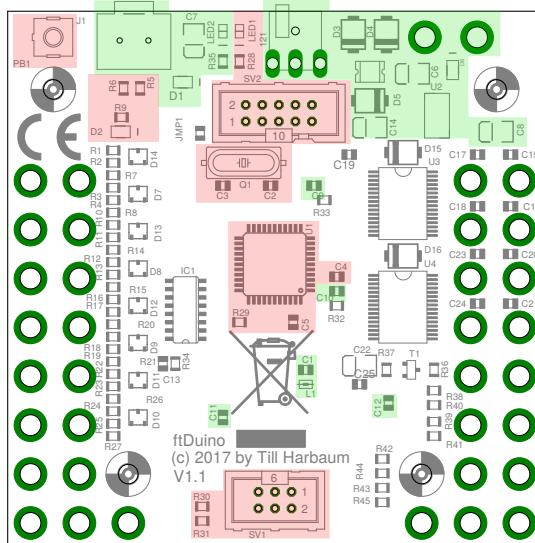


Abbildung 10.3: Komponenten des Mikrocontrollers

Auch der Mikrocontroller darf nicht verpolt werden, was in diesem Fall bedeutet, dass er korrekt orientiert aufgelötet werden muss. Sowohl auf der Platine als auch auf dem Chip-Gehäuse findet sich in einer Ecke eine runde Markierung bzw. Vertiefung. Diese Markierung verweist auf den Pin 1 des Mikrocontrollers und bestimmt die korrekte Orientierung. Ist U1 verlötet werden direkt daneben C5 und R29 montiert.

Die übrigen in dieser Baustufe zu montierenden Komponenten beinhalten die Reset-Logik bestehend aus Taster PB1, sowie Diode D2 und Widerstand R9. Kondensator C4 und die Widerstände R5 und R6 vervollständigen die USB-Schaltung. Den 16-MHz-Systemtakt erzeugen der Quarz Q1 mit den Kondensatoren C2 und C3.

Der I²C-Anschluss SV1 mit seinen Pull-Up-Widerständen R30 und R31 kann ebenfalls jetzt bestückt werden.

Die Leuchtdiode LED1 mit ihrem Vorwiderstand R28 wird direkt vom Mikrocontroller angesteuert und wird ebenfalls jetzt montiert. Bei der Leuchtdiode muss wieder auf korrekte Polarität geachtet werden.

Der sogenannte ISP-Steckverbinder SV2 wird lediglich zum einmaligen Aufspielen des Bootloaders (siehe Abschnitt 1.2.1) benötigt und muss nicht unbedingt fest montiert werden, wenn das Standardgehäuse genutzt werden soll, da es im Gehäuse keinen Ausschnitt für diesen Steckverbinder gibt. Die frei verfügbare Druckvorlage¹ hat einen entsprechenden Ausschnitt und kann auch bei fest montiertem SV2 genutzt werden.

10.2.1 Funktionstest des Mikrocontrollers

Der Mikrocontroller wird von Atmel (bzw. Microchip) mit einem USB-Bootloader² ausgeliefert. Beim Anschluss an einen PC sollte der Mikrocontroller daher vom PC als Gerät namens ATm32U4DFU erkannt werden. Ist das der Fall, dann sind die wesentlichen Komponenten funktionsfähig. Dass Windows keinen Treiber für dieses Gerät hat kann ignoriert werden.

Der DFU-Bootloader ist nicht kompatibel zur Arduino-IDE und die Arduino-IDE bringt ihren eigenen Bootloader mit. Dieser wird einmalig mit einem Programmiergerät über den Steckverbinder SV2 eingespielt („gebrannt“).

Zum Brennen des Arduino-Bootloaders unterstützt die Arduino-IDE eine ganze Reihe von Programmiergeräten. Es reicht eine einfache Variante, wie der USBasp³. Der USBasp wird per USB mit dem PC und über das 10-polige Flachbandkabel mit

¹Gehäusedruckvorlage <https://github.com/harbaum/ftduino/tree/master/case>

²DFU-Bootloader, <http://www.atmel.com/Images/doc7618.pdf>

³USBasp - USB programmer for Atmel AVR controllers, <http://www.fischl.de/usbasp/>

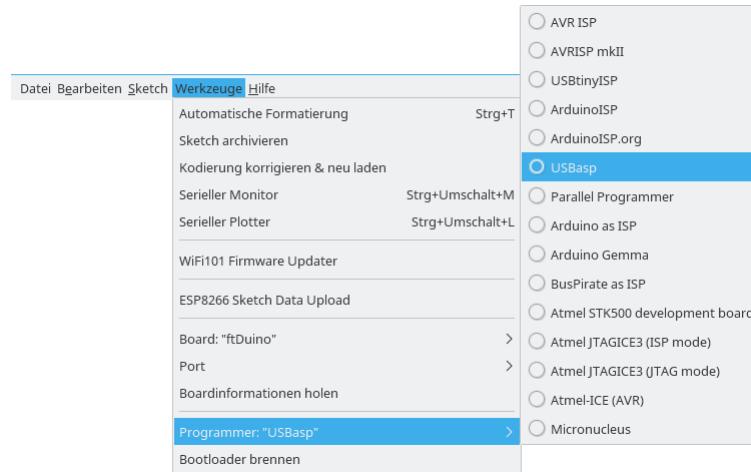


Abbildung 10.4: Brennen des Bootloaders über die Arduino-IDE

SV2 des **ftDuino** verbunden. Ist SV2 nicht bestückt, so kann man einen entsprechenden Stecker lose in die Platine stecken und leicht so verkannten, dass alle Kontakte hergestellt werden. Der eigentliche Flashvorgang dauert nur wenige Sekunden und man kann den Stecker problemlos so lange leicht verkannt festhalten.

Nach dem Brennen sollte der **ftDuino** unter diesem Namen vom Betriebssystems des PC erkannt werden. Er sollte sich von der Arduino-IDE ansprechen und mit einem Sketch programmieren lassen. Es bietet sich für einen ersten Test der Blink-Sketch unter `Datei > Beispiele > FtduinoSimple > Blink` an, da die dafür nötige LED1 ebenfalls gerade montiert wurde.

10.3 Dritte Baustufe „Eingänge“

Die dritte Baustufe ist sehr einfach zu löten und besteht primär aus Widerständen, die zum Schutz der Eingänge verwendet werden.

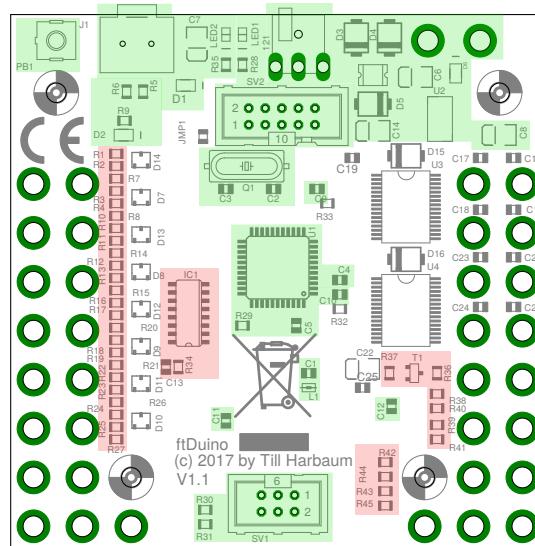


Abbildung 10.5: Komponenten der Eingänge

Die Komponenten der Analogeingänge I1 bis I8 sowie der Zählereingänge C1 bis C4 werden gleichzeitig montiert.

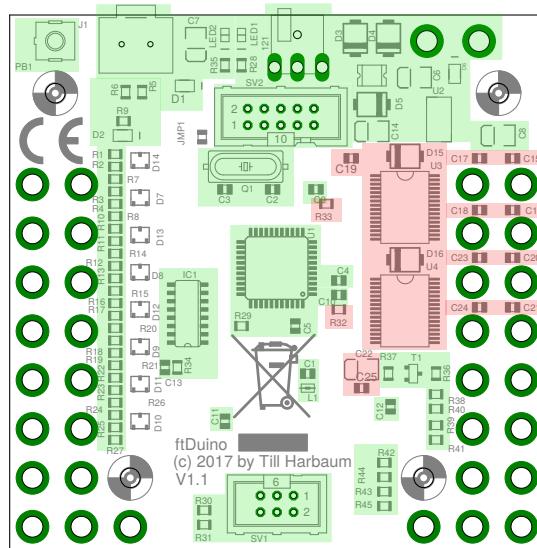
Die Bestückung beginnt mit den Widerständen ganz links und IC1 nach deren Montage die Eingänge I1 bis I8 vollständig sind.

Im zweiten Schritt werden dann die Widerstände R36 bis R46 sowie der Transistor T1 bestückt, was die Zählereingänge vervollständigt. Die Triggerschaltung für den Ultraschall-Entfernungsmesser (siehe Abschnitt 1.2.6) ist damit auch vollständig.

Mit einem passenden Testprogramm sollte nun jeder Eingang einzeln getestet werden, um auch Kurzschlüsse zwischen den Eingängen zu erkennen. Sollte ein Eingang nicht wie gewünscht funktionieren, so kommt als Fehlerquelle auch der Mikrocontroller aus Baustufe 2 in Betracht.

10.4 Vierte Baustufe „Ausgänge“

In der vierten und letzten Baustufe werden die Komponenten montiert, die zum Betrieb der Ausgänge benötigt werden.



Neben der sorgfältigen Kontrolle der Lötstellen ist es daher sinnvoll, den 9-Volt-Zweig für erste Funktionstests aus dem 5-Volt-Zweig zu versorgen. Kurzschlüsse zwischen 5 Volt führenden Signalen führen in der Regel nicht zu Beschädigungen während Kurzschlüsse von 5-Volt-Komponenten mit höheren Spannungen sehr leicht größere Schäden nach sich ziehen.

Achtung: Dabei darf natürlich keine externe 9-Volt-Quelle angeschlossen sein, andernfalls würden die meisten Komponenten des ftDuino sofort Schaden nehmen!

Ist die Brücke gesetzt, so werden auch die Ausgänge des ftDuino mit den internen 5 Volt des ftDuino versorgt und Kurzschlüsse zwischen den Ausgängen und anderen Teilen des ftDuino sind weniger gefährlich. Nun können die Ausgänge mit einer Leuchtdiode auf korrekte Funktion getestet werden. Größere Lasten (Motoren oder Glühlampen) sollten für diesen Test nicht verwendet werden, da die interne 5-Volt-Versorgung nicht darauf ausgelegt ist, solche Lasten zu treiben.

Erst wenn alle Ausgänge bei 5 Volt korrekt funktionieren darf die Brücke entfernt und eine echte 9-Volt-Versorgung angeschlossen werden.

10.4.2 Platinenhistorie

Der ftDuino wird kontinuierlich weiterentwickelt. Daher ändert sich auch die Platine geringfügig. Bisher existieren folgenden Varianten:

- 0.1** Die Testversion des ftDuino basierte noch auf dem Atmega328 und verwendete auch für die Ein- und Ausgänge eine andere Hardware. Von dieser Version wurden 8 Prototypen aufgebaut.
- 1.0** Die erste Version der seriennahen Platine wurde wegen eines Design-Fehlers nur für zehn Prototypen verwendet.
- 1.1** Die erste Serienversion ist in diesem Kapitel abgebildet und die ersten Seriengeräte basierten auf dieser Version. Diese Version konnte optional mit Zenerdioden D10 bis D17 an den Eingängen bestückt werden, was aber in der Serie nicht genutzt wurde.
- 1.2** Die zweite Serienversion verzichtet auf die optionalen und in der Serie nicht genutzten Zenerdioden. Stattdessen erhält diese Version zusätzlich Kontakte für ein internes OLED-Display wie in Abschnitt 1.2.7 beschrieben.
- 1.3** Die dritte Serienversion kann optional mit einem internen Servoadapter wie in Abschnitt 6.13.9 beschrieben versehen werden. Außerdem enthält diese Version einen zusätzlichen ESD-Schutz in der Spannungsversorgung.

Alle Board-Versionen ab Version 1.0 sind logisch und elektrisch kompatibel und verhalten sich aus Anwendersicht identisch.

Anhang A: Schaltplan

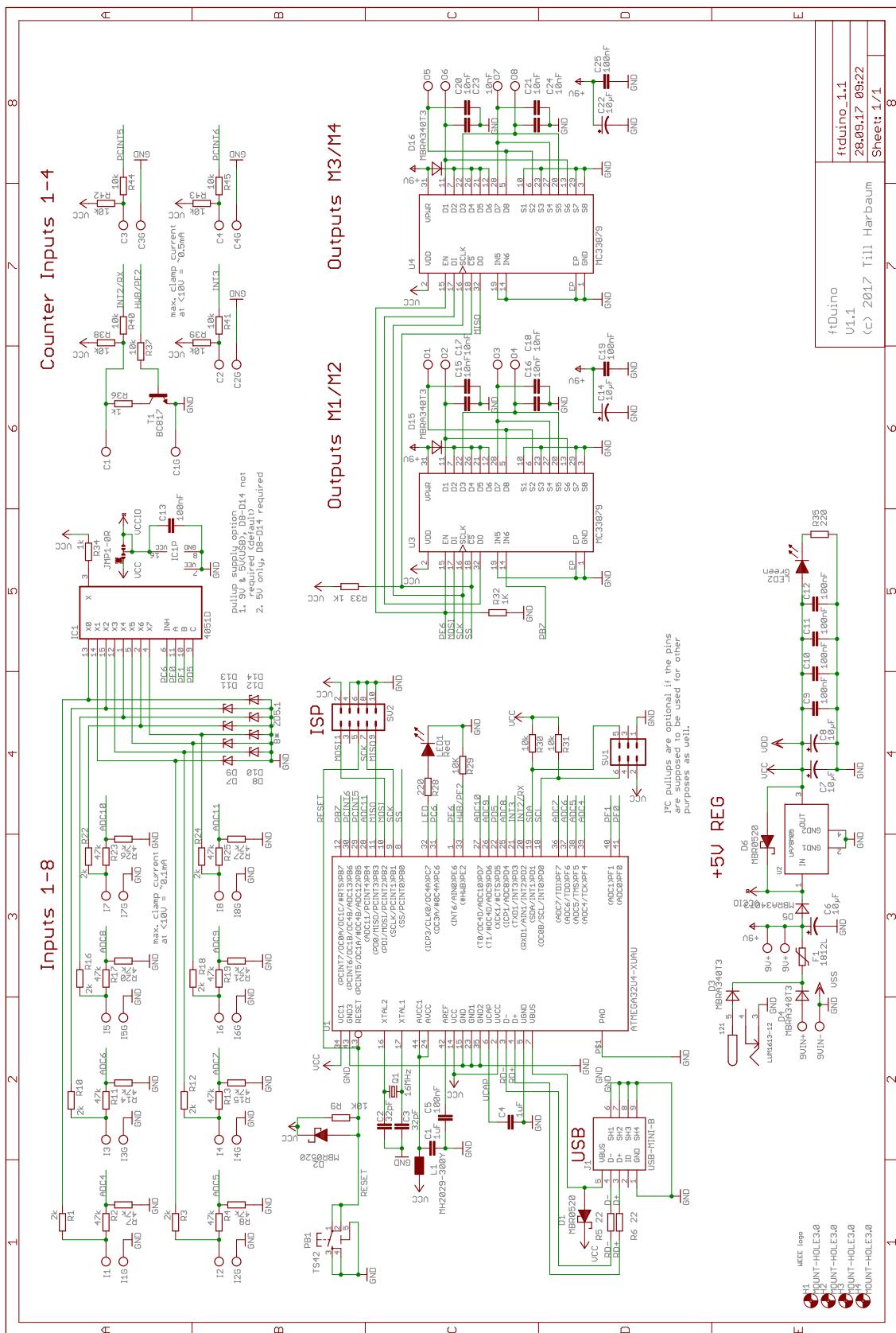


Abbildung A.1: Schaltplan ftDuino Version 1.1

Anhang B: Platinenlayout

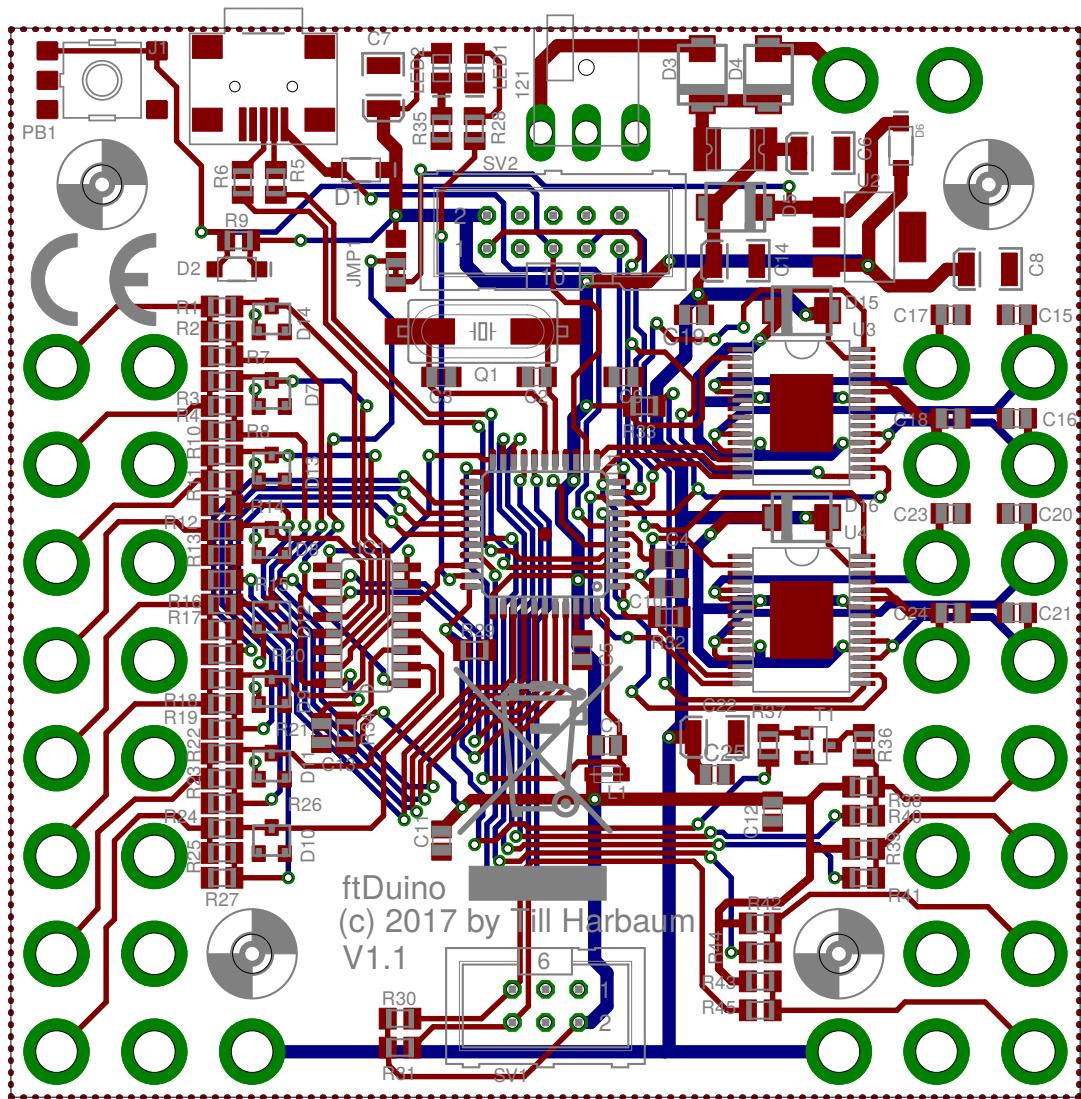


Abbildung B.1: Platinenlayout ftDuino Version 1.1

Anhang C: Bestückungsplan

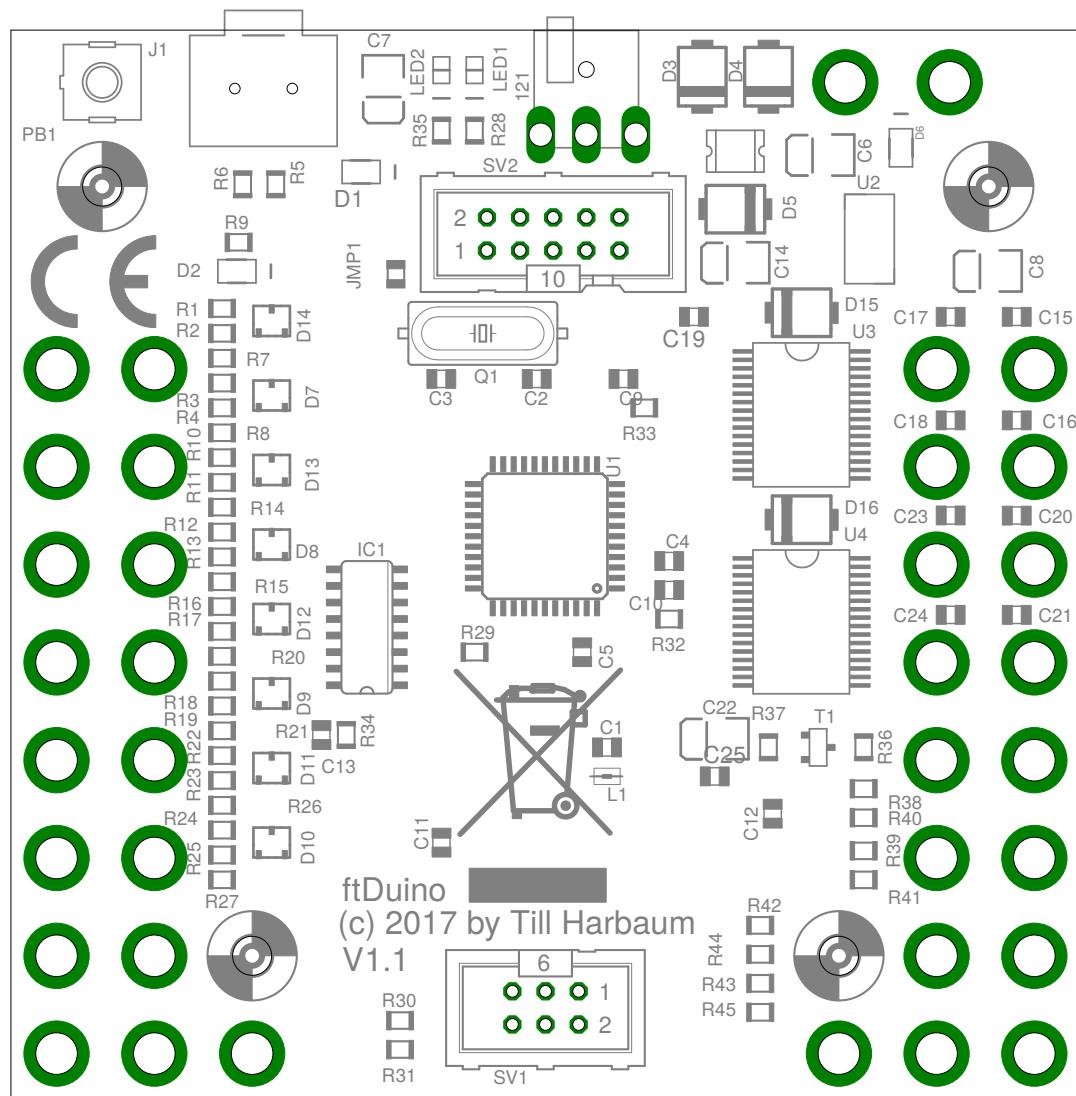


Abbildung C.1: Bestückungsplan ftDuino Version 1.1

Anhang D: Maße

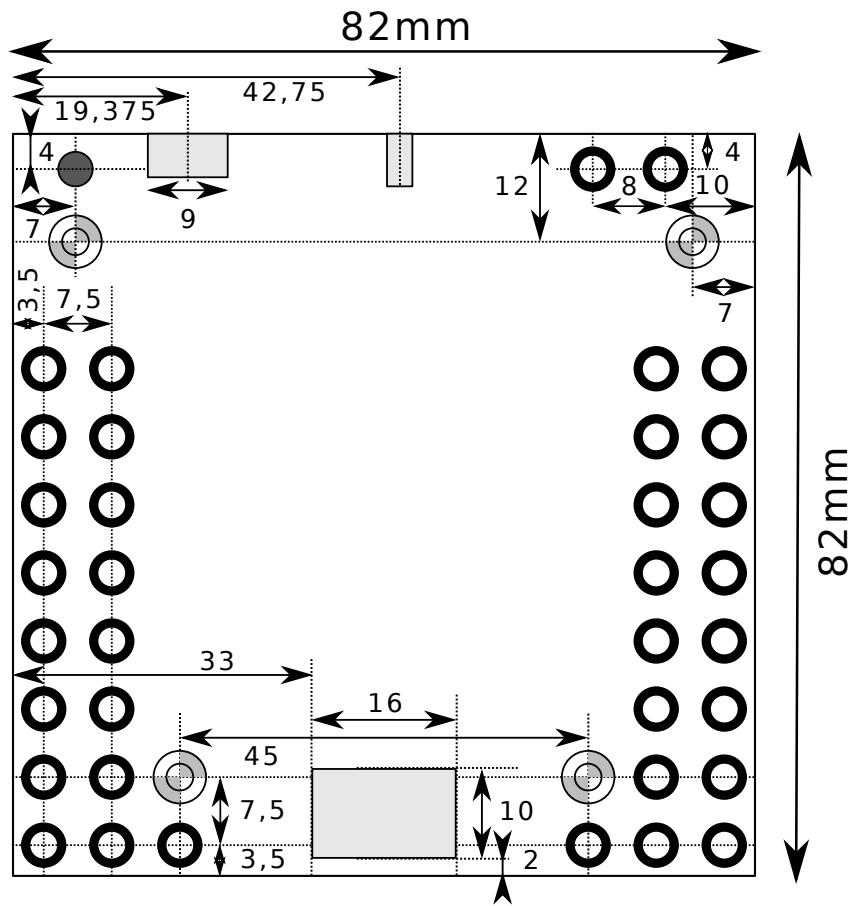


Abbildung D.1: Maße A ftDuino Version 1.1

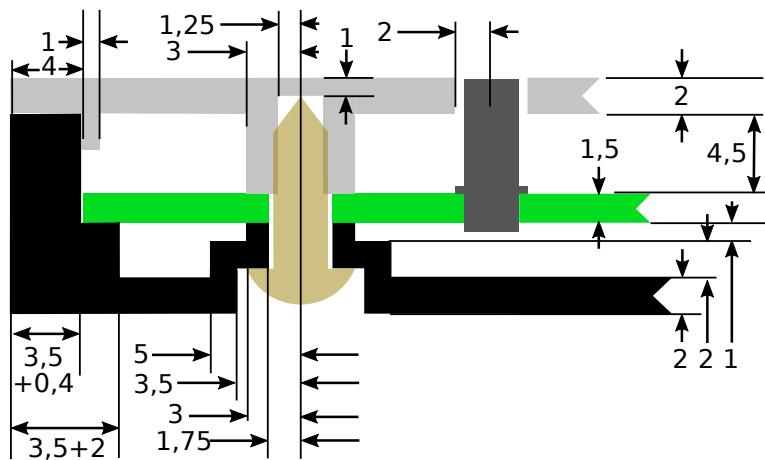


Abbildung D.2: Maße B ftDuino Version 1.1

Anhang E: Gehäuse

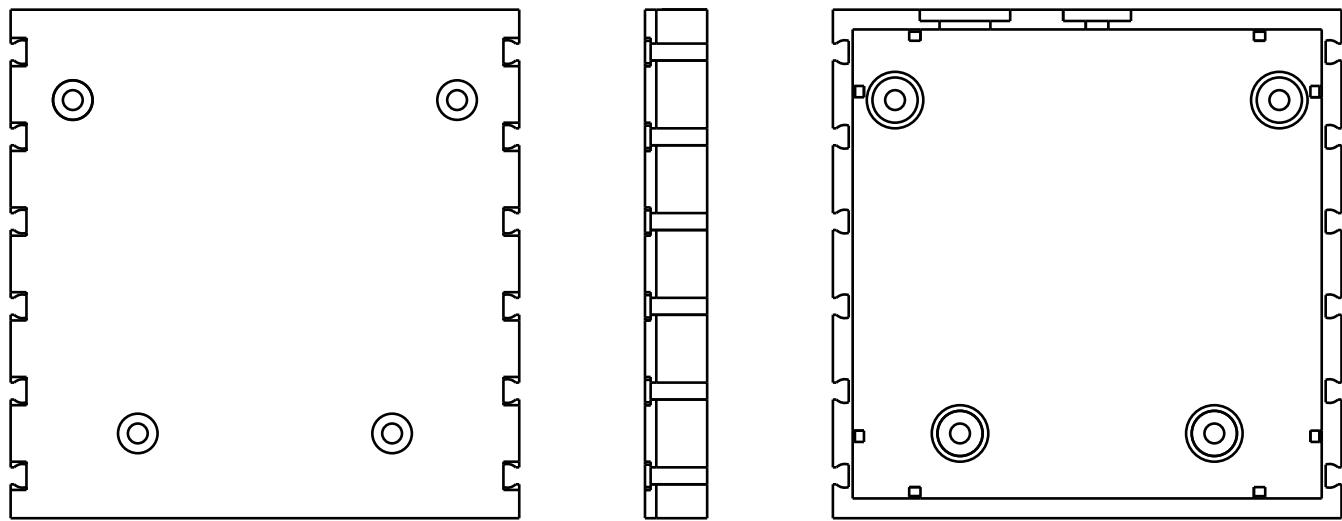


Abbildung E.1: Untere Gehäuseschale

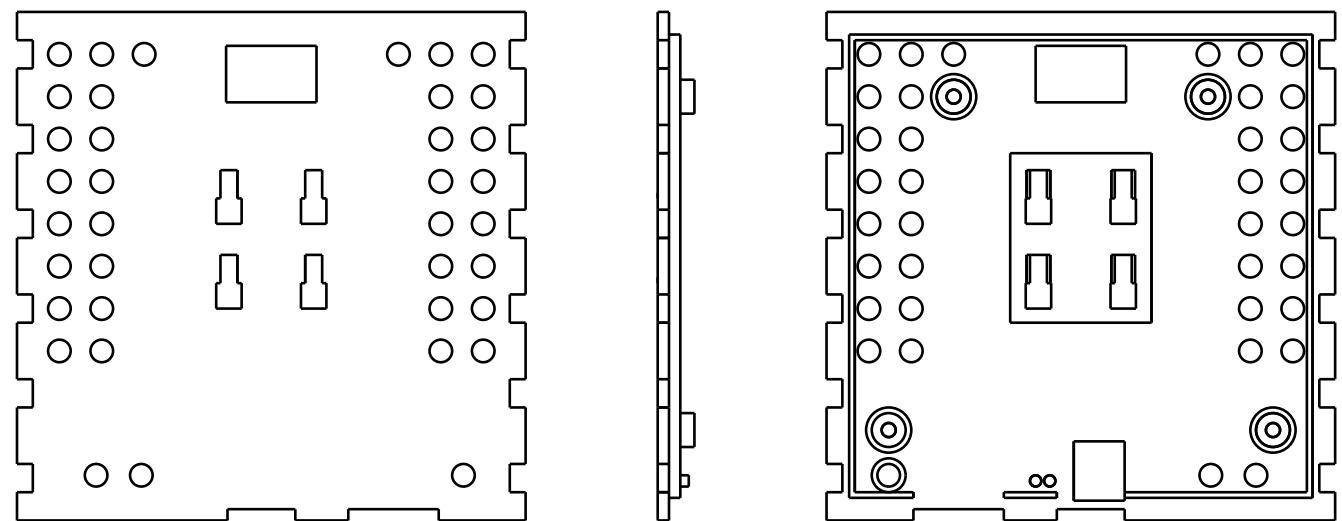


Abbildung E.2: Obere Gehäuseschale