G3078E (D) € 14,90 | CHF 27,00 | (A, B, L) € 16,00

elektor MAG

design > share > earn

597
* SEIT 1961 *
NOVEMBER/DEZEMBER 2023
ELEKTORMAGAZINE.DE

Google Bard und Flux Copilot im Test

KI im Elektroniklabor

FOKUS

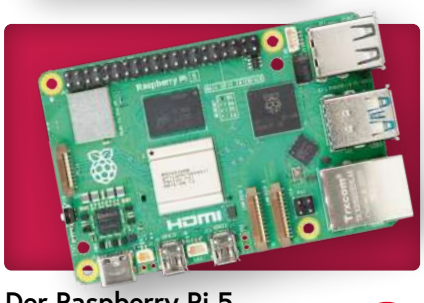
Prototyping und Produktion

Platinenproduktion in kleinen Stückzahlen

Mit und ohne Bestückung

Tools zum Ausprobieren, bevor Sie löten

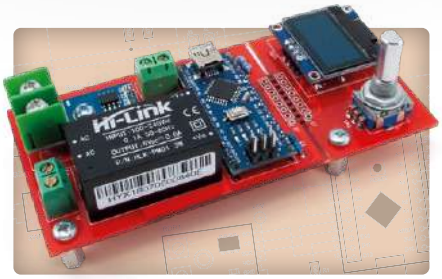
Kostenlose Simulations- und 3D-Modellierungswerkzeuge



Der Raspberry Pi 5
Stark verbessert gegenüber seinem Vorgänger
S. 6



MEMS-Mikrofone
Exzellente Leistung zu niedrigen Kosten
S. 70



Mini-Reflow-Platte
Zur Bestückung und Reparatur kleiner SMD-Schaltungen
S. 120

4 198630 314904 30012



Innovative Menschen haben seit Jahrhunderten über das Potenzial der KI nachgedacht. Jetzt ist es an der Zeit, diese Technologie auf die Probe zu stellen.

MICROCHIP

DEBUGGING
LEICHT GEMACHT



Entdecken, konfigurieren, entwickeln, debuggen, qualifizieren und schnell auf den Markt bringen – mit den Microchip Entwicklungstools für PIC®-, AVR®- und SAM-Mikrocontroller, SAM-Mikroprozessoren und dsPIC®-Digitalsignalcontroller. Wir haben unsere gesamte Palette an Embedded-Software-Entwicklungstools in unsere Embedded-Hardware-Entwicklungstools integriert, so dass Sie alle Möglichkeiten des MPLAB®-Entwicklungs-Ökosystems nutzen können, um eine erstklassige Erfahrung zu erhalten.

PICkit™ 5

Der MPLAB® PICkit 5 In-Circuit Debugger/ Programmer ist ein leistungsfähiges Tool, das schnelles Prototyping und produktionsreife Programmierung für alle Microchip-Geräte ermöglicht. Dieses vielseitige Gerät ist mit einer Reihe von Funktionen ausgestattet, die es zum perfekten Begleiter für Ihre Programmieranforderungen machen.

www.microchip.com/pickit5





MPLAB® ICD 5

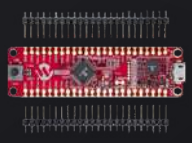
Der MPLAB ICD 5 baut auf den Stärken unseres Mittelklasse-Debuggers auf und bietet instrumentierte Trace-Funktionen (ARM SWO). Mit Unterstützung für alle PIC®-, dsPIC®-, SAM- und AVR®-Bausteine bietet unser neuestes Produkt umfassende Unterstützung für eine Vielzahl von Geräten.

www.microchip.com/icd5

Funktioniert mit diesen und vielen anderen Boards:



PIC32MK MCA
Curiosity Pro
Development
Board



SAM D21
Curiosity Nano
Evaluation Kit



AM E54
Curiosity Ultra
Development Board



PIC32CM JH01
Curiosity Pro
Development
Board



PIC16F15244
Curiosity Nano
Evaluation Kit



EV72Y42A - AVR64DD32
Curiosity Nano
Evaluation Kit



PIC32CX SG61
Curiosity Ultra
Evaluation Board



PIC32CM MC00
Curiosity Pro
Evaluation Kit

Mehr Infos: www.microchip.com/mplab

KI im Elektroniklabor
Google Bard und Flux Copilot im Test 10

Funktionsgenerator mit dem Arduino Nano
Nano + Code = Funktionsgenerator 20



Rubriken

4 Impressum

116 Aller Anfang...
Verstärkung von Unterschieden

130 2023: Odyssee in die KI
Hilfe beim Entwerfen eines physischen Projekts erhalten

134 Ethics in Action
Innovationen aus Brüssel

138 Hexadoku
Sudoku für Elektroniker

Hintergrund



6 Der Raspberry Pi 5
Stark verbessert gegenüber seinem Vorgänger

10 KI im Elektroniklabor
Google Bard und Flux Copilot im Test

34 Ein einfaches CNC-Gehäuse
Schritt für Schritt mit Autodesk Fusion 360

40 Platinenproduktion in kleinen Stückzahlen
Mit und ohne Bestückung

46 IoT-Simulation vereinfacht mit Wokwi
Entwickler Uri Shaked über Entwicklung, Software und mehr

54 Eine Anleitung zur Bare-Metal-Programmierung
Teil 3: CMSIS-Header, automatische Tests und ein Webserver

127 Starte keinen Prototyp – starte mit dem Pretotyp!
Prüfen Sie die Marktchancen für Ihr Produkt

Projekte

20 Funktionsgenerator mit dem Arduino Nano
Nano + Code = Funktionsgenerator

28 Solarbetriebene Weihnachtsgirlande
Eine umweltfreundliche Lösung für die Dekoration Ihres Balkons

32 USB-Killer-Detektor
Besser sicher als traurig

64 LoRa, ein Schweizer Taschenmesser
Teil 2: Hard- und Software

70 MEMS-Mikrofone
Entwicklung und Konstruktion

120 Mini-Reflow-Platte
Für die Bestückung und die Reparatur kleiner SMD-Schaltungen

IMPRESSUM

54. Jahrgang, Nr. 597, November/Dezember 2023
ISSN 0932-5468

Das Elektor Magazin wird 8 mal im Jahr herausgegeben von **Elektor Verlag GmbH**
Lukasstraße 1, 52070 Aachen (Deutschland)
Tel. +49 (0)241 95509190
www.elektor.de | www.elektormagazine.de

Für alle Ihre Fragen: service@elektor.de
Mitglied werden: www.elektormagazine.de/abo

Anzeigen: Büsra Kas
Tel. +49 (0)241 95509178 | busra.kas@elektor.com
www.elektormagazine.de/mediadaten

Cover-Bild
Leonardo.Ai, bearbeitet von Sylvia Sopamena

Urheberrecht
© Elektor International Media b.v. 2023
Die in dieser Zeitschrift veröffentlichten Beiträge, insbesondere alle Aufsätze und Artikel sowie alle Entwürfe, Pläne, Zeichnungen einschließlich Platinen sind urheberrechtlich geschützt. Ihre auch teilweise Vervielfältigung und Verbreitung ist grundsätzlich nur mit vorheriger schriftlicher Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die veröffentlichten Schaltungen können unter Patent- oder Gebrauchsmusterschutz stehen. Herstellen, Feilhalten, Inverkehrbringen und gewerblicher Gebrauch der Beiträge sind nur mit Zustimmung des Verlages und ggf. des Schutzrechtsinhabers zulässig. Nur der private Gebrauch ist frei. Bei den benutzten Warenbezeichnungen kann es sich um geschützte Warenzeichen handeln, die nur mit Zustimmung ihrer Inhaber warenzeichengemäß benutzt werden dürfen. Die geltenden gesetzlichen Bestimmungen hinsichtlich Bau, Erwerb und Betrieb von Sende- und Empfangseinrichtungen und der elektrischen Sicherheit sind unbedingt zu beachten. Eine Haftung des Herausgebers für die Richtigkeit und Brauchbarkeit der veröffentlichten Schaltungen und sonstigen Anordnungen sowie für die Richtigkeit des technischen Inhalts der veröffentlichten Aufsätze und sonstigen Beiträge ist ausgeschlossen.

Druck: Senefelder Misset, Mercuriusstraat 35, 7006 RK Doetinchem (Niederlande)

PEFC Certified
This product is from sustainably managed forests and controlled sources
PEFC
PEFC/30-31-151
www.pefc.org

Distribution:
IPS Pressevertrieb GmbH, Carl-Zeiss-Straße 5
53340 Meckenheim (Deutschland)
Tel. +49 (0)2225 88010

Industry

76 Werkzeuge zum Ausprobieren, bevor Sie löten
Kostenlose Nutzung von Simulations- und 3D-Modellierungstools

80 New Tools von Microchip!
Version 5 von PICkit und ICD jetzt erhältlich

86 Rapid Prototyping von flexibler, dehnbarer Elektronik
Wie Voltera NOVA Innovationen bei tragbaren elektronischen Systemen beschleunigt

90 Galvanische Trennung
Phototransistor-Optokoppler erfolgreich einsetzen

93 Die komplexe Lösung oder die Lösung von Anybus?
Embedded Industrial Ethernet als Kurzstrecke statt als Marathon

96 Ihre essentielle DFM-Checkliste
Wie Sie mit dem Entwurf für die Fertigung beginnen

100 Filamente für den 3D-Druck
Arten, Eigenschaften und Verwendung im Prototyping

104 Spezialisten für eine effektive Signal-auswertung von ELF bis EHF-Band
Aaronias neueste Echtzeit-Spektrum-analyzer der SPECTRAN® V6-Serie

106 Herausforderungen der DFM-Analyse für Flex- und Rigid-Flex-Design

108 Einrichten einer SMT-Fertigungsstrecke

110 Die richtige Kombination für eine zuverlässige Baugruppe

112 Revolution in der Industrie
Der Aufstieg der Autonomen Mobilen Roboter (AMR)

114 Für höchste Anforderungen weiterentwickelt
Rohde & Schwarz MXO 5 mit acht Kanälen ergänzt Oszilloskope der nächsten Generation



34
Ein einfaches CNC-Gehäuse
Schritt für Schritt mit Autodesk Fusion 360

Vorschau

Elektor & Espressif, Gastausgabe 2023

Für die nächste Ausgabe haben sich die Elektor-Redakteure mit den Ingenieuren von Espressif zusammengetan, dem Hersteller der beliebten Mikrocontroller ESP8266 und ESP32. Wie von Elektor nicht anders zu erwarten, stehen DIY-Projekte im Mittelpunkt dieser Ausgabe, aber Sie finden auch ausführliche technische Anleitungen und Hintergrundinformationen zu vielen Themen, zum Beispiel IoT-Protokolle und Cloud-Lösungen, Rust, Sprach- und Musikerkennung, KI-Frameworks, Prototyping und vieles mehr.

Elektor & Espressif, Gastausgabe 2023, erscheint am 13. Dezember 2023.

Elektor Januar/Februar 2024

Das Januarheft ist wie immer randvoll gefüllt mit Schaltungsprojekten, Grundlagen sowie Tipps und Tricks für Elektroniker. Schwerpunkt wird das Thema **Leistung und Energie** sein.

Elektor Januar/Februar 2024 erscheint am 10. Januar 2024.

Änderungen vorbehalten!

Unser Team

Chefredakteur: Jens Nickel (v.i.S.d.P.) | **Redaktion:** Asma Adhimi, Roberto Armani, Eric Bogers, Jan Buiting, Stuart Cording, Rolf Gerstendorf (RG), Ton Giesberts, Hedwig Hennekens, Saad Imtiaz, Alina Neacsu, Dr. Thomas Scherer, Jean-Francois Simon, Clemens Valens, Brian Tristam Williams | **Regelmäßige Autoren:** David Ashton, Tam Hanna, Ilse Joostens, Prof. Dr. Martin Ossmann, Alfred Rosenkränzer | **Grafik & Layout:** Harmen Heida, Sylvia Sopamena, Patrick Wielders | **Herausgeber:** Erik Jansen | **Technische Fragen:** redaktion@elektor.de

EDITORIAL



Jens Nickel
Chefredakteur ElektorMag

Noch mehr Ideen!

Wer kennt es nicht: Nach einigen Entwicklermühen summt und brummt das eigene Projektchen, wird stolz den befreundeten Elektronikern vorgeführt. Genial, nicht wahr? Sicher wäre das auch etwas für andere Kreative, die an einem ähnlichen Problem herumtüfteln? Eventuell hätten sogar Nicht-Elektroniker Verwendung dafür. Aber dann müsste natürlich noch ein schöneres Gehäuse, ein Manual und ein intuitives User-Interface her. Und eine Option für ein Firmware-Update aus der Ferne...

Manche erfolgreiche Erfindung in der Elektronik-Geschichte ist auf solche Weise entstanden. Falls Sie aber wirklich vorhaben, mit einem tollen Projekt Geld zu verdienen, sollten Sie anders vorgehen. Ich lege Ihnen den Artikel auf Seite 127 ans Herz. Unser Interview-Partner Alberto Savoia beschreibt, warum die genialsten Ideen mitunter von vorne herein zum Scheitern verurteilt sind, und was man klären sollte, bevor der erste Prototyp gebaut wird.

Wenn es dann ans Entwickeln geht, stehen - wie könnte es heute anders sein - AI-Tools bereit, um ihre Dienste anzubieten. Wie gut das bei der Suche nach Bauteilen sowie beim Eingliedern von Komponenten in den eigenen Schaltplan gelingt, beschreibt Tam Hanna ab Seite 10. Wenn Sie diese Zeilen lesen, sind die Tools möglicherweise noch besser geworden. Probieren Sie es doch gleich mal aus, und teilen Sie mir Ihre Erfahrungen mit (redaktion@elektor.de).

Das Thema AI hat auch unsere Grafiker erneut inspiriert. Bei unserem Titelblatt kam der Bildgenerator Leonardo Ai zum Einsatz. Doch glauben Sie mir, die Ideenfindung ist dadurch nicht leichter geworden - in unserem Cover-Meeting haben wir zwei Stunden verschiedene Vorschläge diskutiert. Das demonstriert sehr gut, dass uns die Künstliche Intelligenz kreative Prozesse nicht abnimmt, sondern schlicht noch mehr Möglichkeiten als bisher aufzeigt.

Lassen Sie uns gemeinsam davon profitieren!

Der Raspberry Pi 5

Gegenüber seinem Vorgänger enorm verbessert

Von Saad Imtiaz (Elektor)

Der brandneue Raspberry Pi 5 ist da, und eine der ersten Fragen, die einem in den Sinn kommt, ist, wie viel besser und schneller er im Vergleich zu seinem Vorgänger ist. Nun, es hat sich eine Menge geändert, und es wurden viele Funktionen hinzugefügt und verbessert. Man kann ohne weiteres sagen, dass der neue Raspberry Pi 5 doppelt so schnell ist wie der Raspberry Pi 4. In diesem Artikel gehen wir auf einige neue Funktionen, Benchmark-Vergleiche, Wärmeentwicklung und mehr ein.

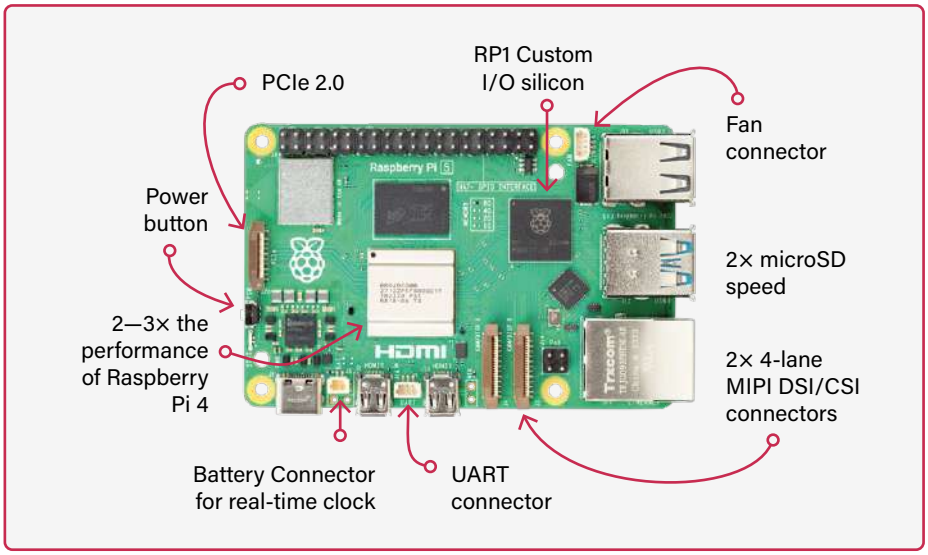
Der Raspberry Pi 5 hat die gleiche Größe einer Kreditkarte wie die vorherigen Generationen, aber es hat sich dennoch viel geändert. Beginnen wir mit der neuen CPU Cortex-A76, die mit 2,4 GHz getaktet wird, und einer neuen Video Core 7 GPU mit 1 GHz. Raspberry Pi behauptet, dass dies einen beträchtlichen Leistungssprung bedeutet, und das tut es auch: Wir werden dies später in einigen Vergleichen genauer untersuchen.

RAM und mehr

Eine weitere Änderung betrifft den Arbeitsspeicher: Der neue Raspberry Pi 5 verfügt nun über DDR4X-RAM anstelle des bisher verwendeten DDR4-RAM. Dies ermöglicht dem Raspberry Pi 5 eine höhere Taktrate bei geringerem Strombedarf, schon einmal ein Schritt in die richtige Richtung. Als wir einige RAM-Geschwindigkeitstests mit dem Raspberry Pi 5 durchführten, erhielten wir bemerkenswerte Ergebnisse. Der Raspberry Pi 5 war in der Lage, fast 30.000 MB pro Sekunde zu schreiben und zu lesen, und gewann damit haushoch den Vergleich mit dem Raspberry Pi 4, der nur 4.000 MB bis 6.000 MB pro Sekunde schaffte.

Eine weitere wichtige Verbesserung ist der microSD-Kartensteckplatz, der jetzt den Hochgeschwindigkeitsmodus SDR104 unterstützt. In unseren Tests waren die Geschwindigkeiten der SD-Karte doppelt so hoch wie bei der letzten Generation. Dies ist der von Raspberry Pi entwickelten neuen RP1-Southbridge zu verdanken.

Der Raspberry Pi 5 ist der erste voll ausgestattete Raspberry-Pi-Computer, der selbst entwickeltes Silizium verwendet. Die RP1-Southbridge bietet eine verbesserte Leistung bei den I/O-Fähigkeiten und Funktionen, darunter eine verdoppelte USB-Bandbreite, 2×4-Lane-MIPI-Schnittstellenunterstützung und eine Single-Lane-PCI-Express-2.0-Schnittstelle.



Neu: PCI, Kameras, Displays...

Etwas, was sich gegenüber der vergangenen Version nicht geändert hat, ist die Abteilung WLAN und Ethernet. Doch wir sind doch vor allem an den Unterschieden und Neuerungen interessiert. Lassen wir sie also kurz Revue passieren!

Eine wichtige Neuerung des Raspberry Pi 5 ist die Single-Lane Gen 2 PCIe-Verbindung, die den Raspberry Pi 5 in die Lage versetzt, eine NVMe- oder M.2-SSD zu nutzen, mit dem Potenzial für wesentlich schnellere Lese- und Schreibgeschwindigkeiten sowie eine deutlich verbesserte Leistung. Dies ermöglicht es auch, Peripheriegeräte mit hoher Bandbreite anzuschließen.

Es gibt zwei Kamera-/Display-Anschlüsse, so dass Sie zwei Kameras an Ihren Raspberry Pi 5 anschließen können, oder eine Kamera und ein Display, oder sogar zwei Displays.

An Bord befindet sich ein neuer Lüfteranschluss, über den die Drehzahl eines Lüfters gesteuert werden kann, der den Kühlkörper des Raspberry Pi bedeckt. Zusätzlich zum Lüfteranschluss gibt es jetzt einen UART-Anschluss, einen Power-Button zum Neustarten oder Herunterfahren, deutlich verbesserte Geschwindigkeiten der USB-3.0-Anschlüsse (bis zu 5,1 Gbit/s) und eine integrierte Echtzeituhr (RTC), die von einer externen Knopfzelle mit Strom versorgt werden kann. **Tabelle 1** zeigt die vollständige Liste der Spezifikationen, die sich vom Raspberry Pi 4 unterscheiden.

Tabelle 1: Vergleich Raspberry Pi 4 vs. Raspberry Pi 5

	Raspberry Pi 4	**Raspberry Pi 5**	
CPU	Broadcom BCM2711, Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SOC @ 1,8 GHz	**Broadcom BCN12712, Quad-core Cortex-A76 (ARM v8), 64-bit SOC @ 2,4 GHz**	**2–3-fache Leistung**
RAM	1 GB, 2 GB, 4 GB, 8 GB	1 GB, 2 GB, 4 GB, 8 GB	
Konnektivität	2.4 GHz and 5.0 GHz 802.11 ac wireless Bluetooth 5.0, BLE Gigabit Ethemet n. a. 2× USB 3.0, 2× USB 2.0 40-poliger GPIO-Header (RPi-Standard) 2 Ports Micro HMDI (bis 4K 60p) 2-lane MIPI DSI, 2-lane MIPI CSI 4-poliger Anschluss für Stereo-Audio and FBAS-Video	2.4 GHz und 5.0GHz 802.11 ac wireless Bluetooth 5.0, BLE Gigabit Ethemet **1× PCIe 2.0 interface** **2× USB 3.0 (5 Gbit/s)**, 2× USB 2.0 40-poliger GPIO-Header (RPi-Standard) 2 Ports Micro HDMI (bis 4K 60p) **2× 4-lane MIPI (DSI/CSI)** **n. a.**	**Hochgeschwindigkeits-Peripherieschnittstelle (für SSDs etc.)**
OS und Datenspeicher	microSD-Karteneinschub	microSD-Karteneinschub **mit Unterstützung des Hochgeschwindigkeitsmodus SDR104**	**2× Interface-Geschwindigkeit**
Stromaufnahme	3 A bei 5 V (über USB-C-Buchse oder GPIO)	**5 A DC bei 5 V DC (PD-Unterstützung)**	**Neues Steckernetzteil für den RPi 5**
PoE	Über separate PoE-HAT	**Über (neue) separate PoE- HAT**	**Vollständig konform zu PoE 802.3at**
Real-time Clock (RTC)	n. a.	**RTC und RTC-Batterieanschluss**	

Leistungsvergleiche

Wir haben einige Benchmarks mit dem Raspberry Pi 5 [1] und dem Raspberry Pi 4 [2] durchgeführt, wobei wir den Aufbau und die Hardware des Raspberry Pi 5 und des Raspberry Pi 4 beibehalten haben - also die gleiche Software auf der SD-Karte, die gleiche Stromversorgung und mit und ohne Kühllösung. Über die **Weblinks** können Sie sich alle Benchmark-Ergebnisse von Geekbench 5 ansehen. Wer es kurz und bündig mag: In **Bild 1** und **Bild 2** sehen Sie die Gesamt-Benchmark-Ergebnisse des Raspberry Pi 5 und des Raspberry Pi 4, die deutlich zeigen, dass der Raspberry Pi 5 in allen Tests zwei- bis dreimal so schnell ist wie sein Vorgänger.



Bild 1. Geekbench 5, Benchmark-Ergebnisse für den Raspberry Pi 5, 8 GB.



Bild 2. Geekbench 5, Benchmark-Ergebnisse für den Raspberry Pi 4, 8 GB.

Thermische Eigenschaften

Je schneller eine CPU ist, desto mehr Strom benötigt sie üblicherweise, und je mehr Strom fließt, desto mehr Abwärme wird produziert. Wir haben einige Wärmebildaufnahmen des Raspberry Pi 5 und 4 sowohl unter Last als auch im Leerlauf gemach, und dabei auch den neuen aktiven Kühler

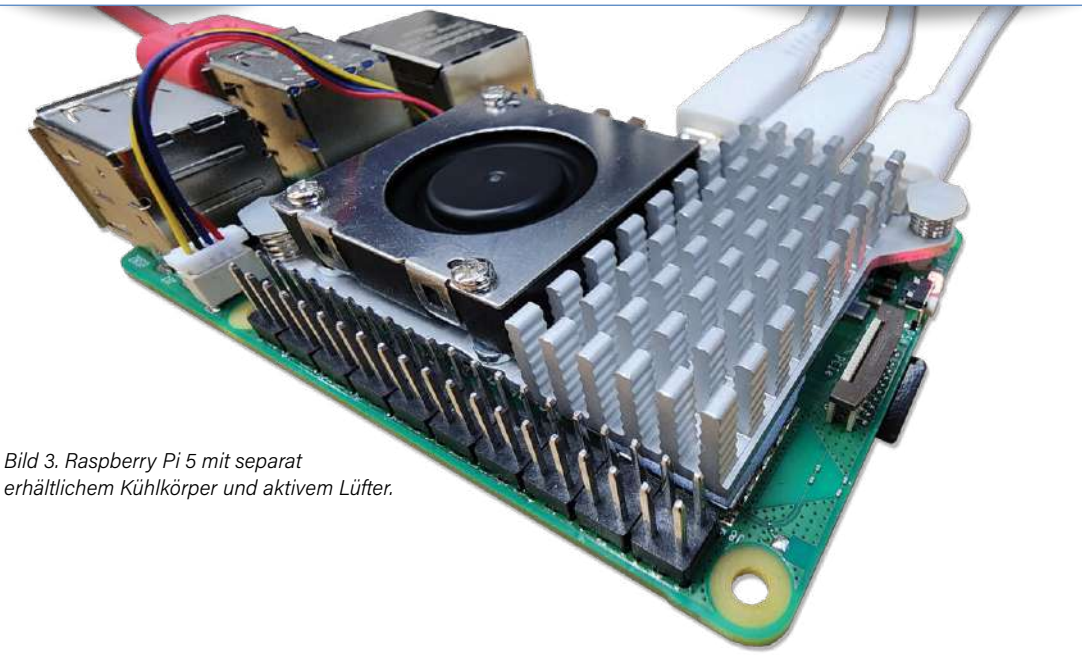


Bild 3. Raspberry Pi 5 mit separat erhältlichem Kühlkörper und aktivem Lüfter.

des Raspberry Pi getestet, der in **Bild 3** zu sehen ist.

Beim Ausführen von Benchmarks und einigen CPU- und GPU-intensiven Aufgaben erreichte der Raspberry Pi 5 ohne Kühlung fast 78 °C (auf Chipebene) bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C im Testlabor. Andererseits erreichte der Raspberry Pi 4 ohne Kühlung unter der gleichen Last maximal 71 °C (auf Chipebene) - natürlich nicht mit der gleichen Leistung. In **Bild 4** und **Bild 5** sind Wärmebilder des Raspberry Pi 5 und des Raspberry Pi 4 zu sehen. Diese Temperaturen sind recht hoch, und es wird empfohlen, die von Raspberry Pi vorgeschlagene Kühllösung zu verwenden. In **Bild 6** sehen Sie das Wärmebild des Raspberry Pi 5 mit dem installierten aktiven Kühler, der die Temperatur auf Chipebene auf 58 °C senkt - der Unterschied von 20 Grad wird allein durch die Kühleinheit erreicht! In Zukunft freuen wir uns auf neue thermische Lösungen und Gehäuse von Drittanbietern, die die thermischen Eigenschaften noch weiter verbessern.

Ist das etwas für Sie?

Der Raspberry Pi 5 ist ein Wendepunkt in der Welt der Einplatinencomputer. Seine beeindruckenden Hardware-Upgrades, von der neuen CPU und GPU bis hin zum DDR4X-RAM, machen ihn zu einem Kraftpaket im Scheckkartenformat. Es gibt zahlreiche Peripherieoptionen, von mehreren Displays über Dual-Kameras bis hin zu M.2-SSDs. Leider sind die USB-Anschlüsse nicht USB-C, aber wir können darauf hoffen, dass dies in einer zukünftigen Version der Fall sein wird.

Während er viel von dem Charme und dem Formfaktor beibehält, den Fans lieben, verdoppelt der neue Raspberry Pi die Leistung, was ihn zu einem überzeugenden Angebot sowohl für Neueinsteiger als auch für Raspberry-Pi-Veteranen macht.

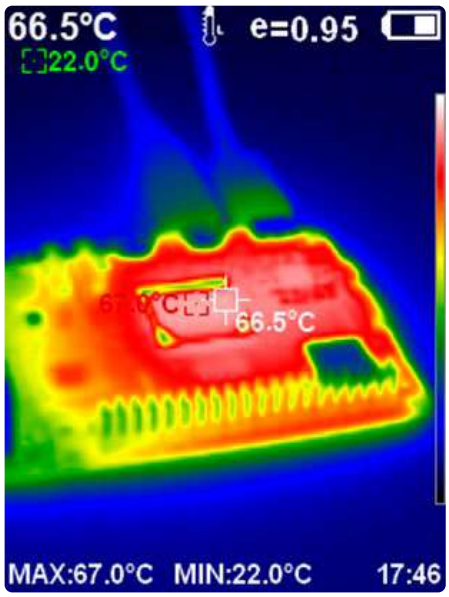


Bild 4. Wärmebild des Raspberry Pi 5 - ohne aktive Kühlung.

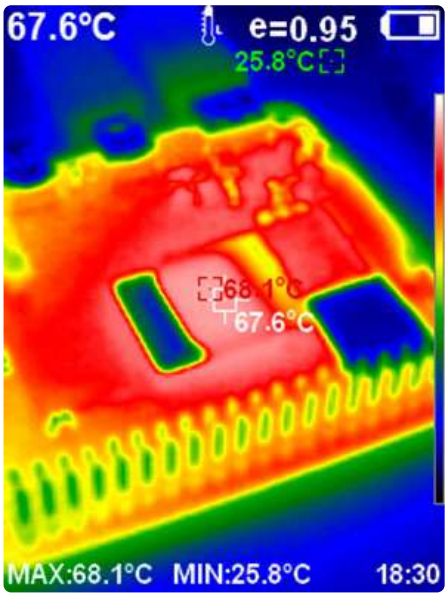


Bild 5. Wärmebild des Raspberry Pi 4 - mit aktiver Kühlung.

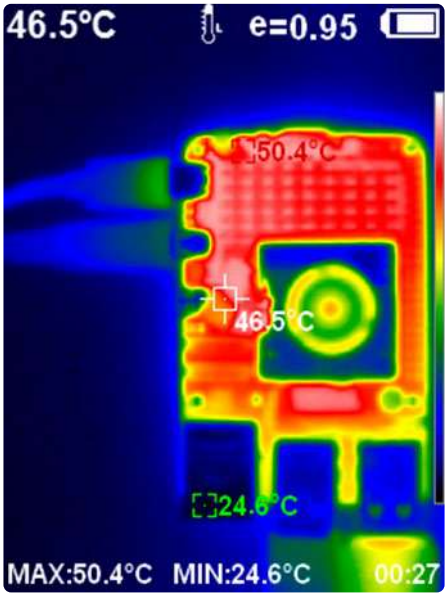


Bild 6. Wärmebild des Raspberry Pi 5 - mit aktiver Kühlung.

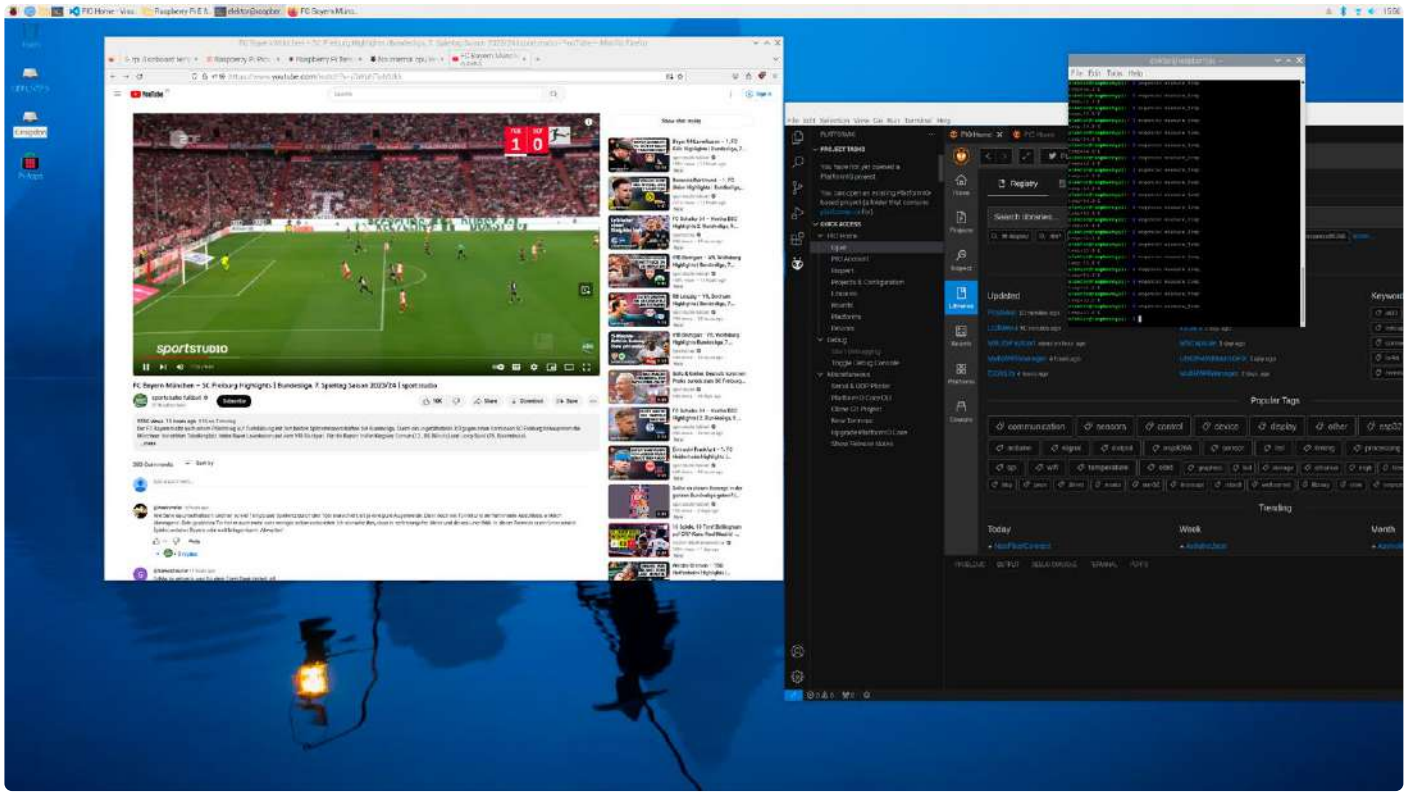


Bild 7. Raspberry Pi 5 bei normaler Arbeitslast im Test der Tauglichkeit als Alltagscomputer.

Wir haben versucht, ihn als echten Computer zu verwenden, mit normaler täglicher Arbeitsbelastung, indem wir ein 1080p-Video auf YouTube abspielten und gleichzeitig etwas in Visual-Studio-Code für den ESP32 programmierten (**Bild 7**). Es stellte sich heraus, dass er anständig funktioniert und in einem Szenario verwendet werden kann, in dem kein Laptop oder Computer zur Verfügung steht (verwenden Sie eine Powerbank, um ihn mit Strom zu versorgen). Insgesamt ist er eine großartige Ergänzung der Raspberry-Pi-Familie, die den höheren, aber immer noch attraktiven Preis rechtfertig.

Wenn Sie sich einen Raspberry Pi zulegen möchten, verspricht der Raspberry Pi 5 ein völlig neues Niveau an Bastelei, Entwicklung und Spaß.

RG – 230635-02

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Wenn Sie Fragen zu dieser Review haben, schicken Sie bitte eine E-Mail an den Autor unter saad.imtiaz@elektor.com oder an das Redaktionsteam unter redaktion@elektor.de.

Elektor-Ressourcen für den Raspberry Pi 5

Der schnelle Raspberry Pi 5, ein Muss für professionelle Ingenieure, Maker und Studenten gleichermaßen, dient als ideale Grundlage. Egal, ob Sie einen Desktop-Computer bauen oder einen intelligenten Roboter einsetzen wollen, Elektor bietet eine Fülle von Artikeln und Videos zu diesem vielseitigen Board.
https://elektormagazine.de/rpi5

Passende Produkte

- **Raspberry Pi 5 (4 GB RAM)**
  www.elektor.de/20598
- **Raspberry Pi 5 (8 GB RAM)**
  www.elektor.de/20599
- **Offizielles Gehäuse für Raspberry Pi 5 (weiß/rot)**
  https://elektor.de/official-case-for-raspberry-pi-5-white-red
- **Aktive Kühleinheit für Raspberry Pi 5**
  https://elektor.de/active-cooler-for-raspberry-pi-5

WEBLINKS

[1] Raspberry Pi 4, Model B, Rev 1.4 - Geekbench: https://browser.geekbench.com/v5/cpu/21819994
[2] Raspberry Pi 5, Modell B, Rev. 1.0 - Geekbench: https://browser.geekbench.com/v5/cpu/21819518

KI im Elektroniklabor

Schaltungsdesign, Bauteil-Suche, Software

Von Tam Hanna (Ungarn)

Die Leistungen von ChatGPT und Co. haben in populärwissenschaftlichen Medien für erhebliche Aufregung gesorgt. Aus der Logik folgt, dass zur Verarbeitung allgemeiner Sprachen vorgesehene Modelle mit der „eingeschränkteren" und deshalb einfacher zu formalisierenden Syntax von Programmcode und Schaltungsfunktionen ebenfalls zurechtkommen. In diesem Artikel wird der Autor zwei weit verbreitete Systeme einem praxisnahen Workout unterziehen - Google Bard und Flux Copilot.

Gleich in der Einleitung sei gesagt, dass für einen diensterfahrenen Elektroniker von Bard und Flux Copilot keinerlei Gefahr ausgeht. Ganz analog zur einst bei Oszilloskopen eingeführten fortgeschrittenen Analysefunktion gilt auch im Fall von Künstlicher Intelligenz das von Chivers beschriebene Gatling-Paradoxon: Wenn ein System (wie die Gatling Gun) die Effizienz eines Arbeiters erhöht, so erledigt dieser Arbeiter mehr Arbeiten; seine Kollegen können dann ebenfalls mehr tun, was unterm Strich zu höherer Produktivität führt.

Da der Autor dieser Zeilen Wert auf die Unterscheidung zwischen Elektroniker und Elektronik-Ethiker legt, wollen wir diese Gedanken an dieser Stelle sein lassen und uns der gewinnbringenden Wissenschaft zuwenden.

Google Bard

KI-Systeme haben insbesondere in der heutigen politisch aufgeladenen Welt das Potenzial, durch Fehlkorrelationen erhebliche Reputationsschäden für das anbietende Unternehmen zu schaffen. Google begegnet dieser Gefahr insofern, als der KI-Dienst Bard zwar allgemein freigegeben wurde. Es gilt allerdings nach wie vor, dass Bard nur in einer vergleichsweise eingeschränkten Anzahl von Ländern zur Verfügung steht. Österreich, Ungarn und die Slowakei wurden erst wenige Tage vor Druckschluss in die unter [1] bereitstehende Liste der erlaubten Aufenthaltsorte aufgenommen. Angemerkt sei außerdem, dass das System mittlerweile auch Deutsch spricht; der Autor experimentiert in den folgenden Schritten trotzdem auf Englisch. Die praktische Erfahrung lehrt, dass englische Ergebnisse besser ausfallen.

Wer nicht in einem der erlaubten Länder lebt, muss indes nicht verzagen. Google überprüft die Nutzungs-Berechtigung nicht über den Aufenthaltsort des Kontos, sondern durch eine permanente Validierung der Geo-Lokation der zum Aufruf verwendeten IP-Adresse. Daraus folgt, dass die Nutzung eines VPN empfehlenswert ist - im Prinzip handelt es sich dabei um ein System, das der Gegenstelle wie in **Bild 1** gezeigt eine andere IP-Adresse vorgaukelt. Problematisch ist an der Nutzung derartiger VPN-Dienste im Zusammenspiel mit Google-Servern, dass Google ein für Botmaster und Co. attraktives Ziel abgibt und deshalb viele VPNs auf IP-Ebene blockt. In Tests des Autors funktionierte Proton VPN im Allgemeinen problemlos - manchmal waren allerdings einige zusätzliche Captchas abzunicken, um die Menschlichkeit des Abfrage-Senders gegenüber Google zu bestätigen.

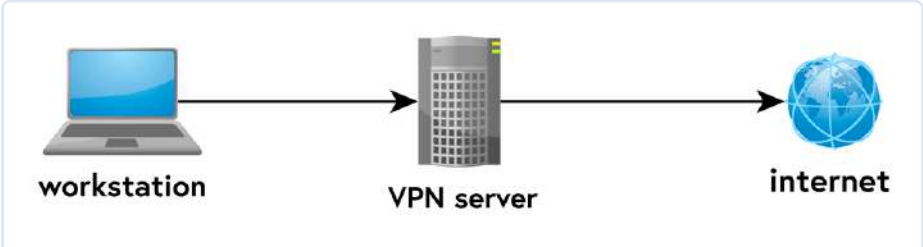


Bild 1. VPN-Dienste sind heute kommerziell erhältlich.

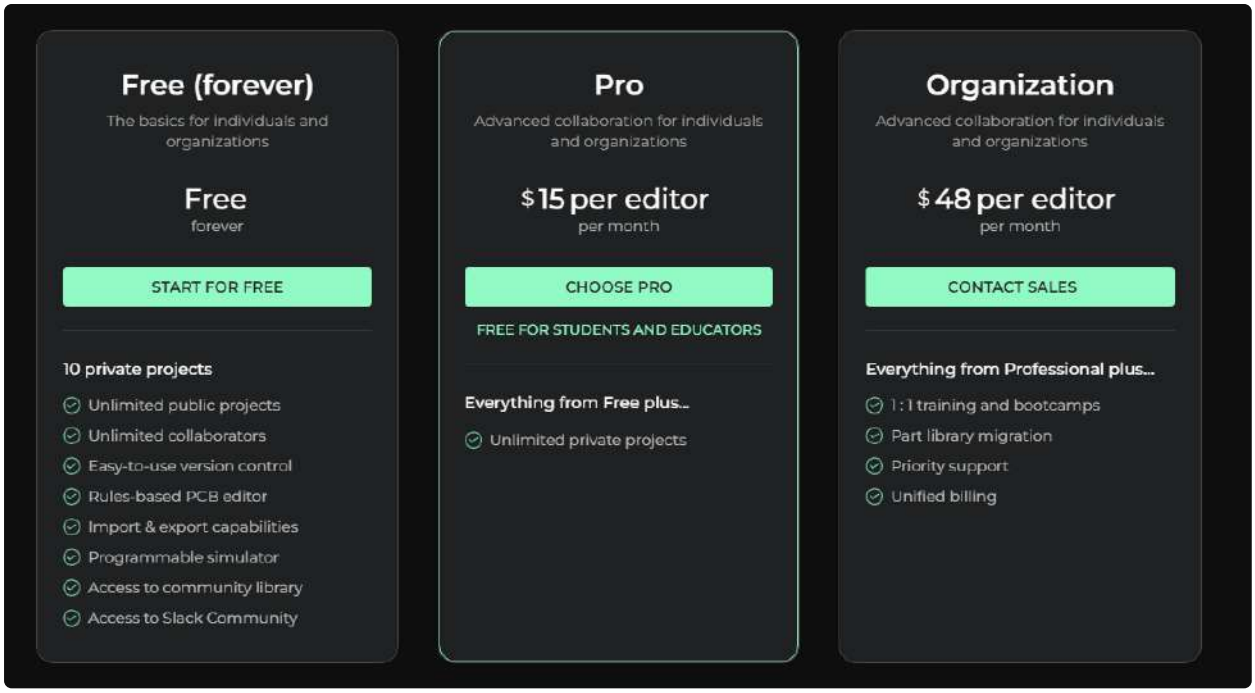


Bild 2. Nur wer Flux nicht „öffentlich" nutzt, muss Gebühren bezahlen.

Im nächsten Schritt ist das Aufrufen der URL [2] erforderlich. Google kündigte auf der I/O-Entwicklerkonferenz an, dass der Bard-Dienst fortan „ohne Warteliste" verfügbar ist - als sich der Autor vor einigen Wochen erstmals anmeldete, dauerte sein Aufenthalt auf der Warteliste nur wenige Stunden. Angemerkt sei allerdings, dass in der Literatur mitunter von Wartezeiten von einigen Tagen berichtet wird.

Flux Copilot

Während Googles Bard eine General-Purpose-AI darstellt, die auch Fragen nach einem Risottorezept beantwortet, steht mit Flux Copilot [3] eine auf die Bedürfnisse von Elektronikern optimierte KI am Start.

Flux selbst ist dabei ein komplett im Browser lebendes EDA-System, samt Schaltungsdesign, Simulation und PCB-Routing. Die KI-Funktionen sind „nur nebenbei" integriert. Angemerkt sei, dass Flux in der quelloffenen Variante kostenlos ist. **Bild 2** zeigt, dass nur dann Kosten anfallen, wenn die in Flux verwalteten Projekte in größerem Rahmen geheim gehalten werden sollen.

Zehn kostenlose Projekte!

In der komplett kostenfreien Version von Flux stehen zum Zeitpunkt der Drucklegung zehn private Projekte zur Verfügung. Die praktische Erfahrung lehrt allerdings, dass derartige „free allowances" schneller verschwinden, als es dem diensthabenden Elektroniker lieb sein kann.

Der Autor wird in den folgenden Schritten die kostenlose Basisvariante verwenden - neben einem „vollwertigen" Account ist es auch möglich, sich unter Nutzung von Gmail oder GitHub gegenüber den Flux-Servern auszuweisen. Interessant ist dabei, dass Sie auch bei Nutzung von Gmail einen „lokalen" Benutzernamen festlegen müssen.

Für die eigentliche Inbetriebnahme von Flux ist es dann nur noch notwendig, auf den grünen *Create Project*-Knopf zu klicken. Copilot lebt normalerweise - wie in **Bild 3** gezeigt - in der *Chat*-Pane, wo er auf Zuruf aktiv wird.

Künstliche Intelligenz als „Laborant"

Ein alter Kalauer besagt, dass das Wissen über den Ort einer Information 80% der Lösung darstellt - die Beschaffung des Dokuments ist dann oft nur der kleinere Teil der Mühe. Bei der Arbeit mit elektronischen Bauteilen gilt dies logischerweise analog. In manchen Kategorien listet ein Distributor wie Mouser Tausende von Komponenten; Hunderte von Halbleiterherstellern versuchen, durch die Special-Function-ICs „Mind Share" in der Entwicklerschaft abzugreifen. Aus der Logik folgt, dass ein auf Informationsverarbeitung spezialisiertes System in diesem Bereich hilfreich sein könnte - als erste Aufgabe wollen wir die beiden Systeme deshalb mit der Einholung von Informationen und einem einfachen Schaltungsdesign beauftragen.

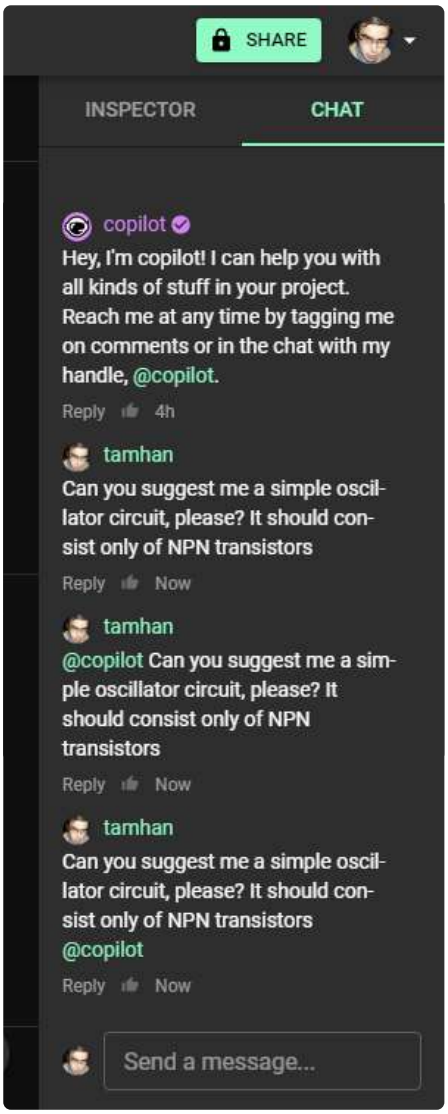


Bild 3. Flux integriert den hauseigenen KI-Assistenten in eine Pane des EDA-Werkzeugs.

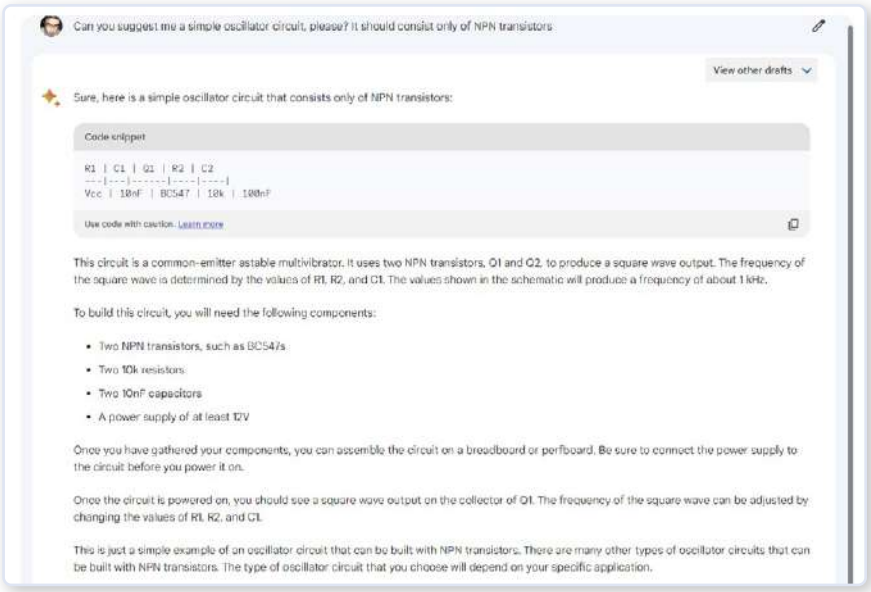


Bild 4. Die Suche nach dem Astabilen Multivibrator ist für Bard nur leidlich bewältigbar.

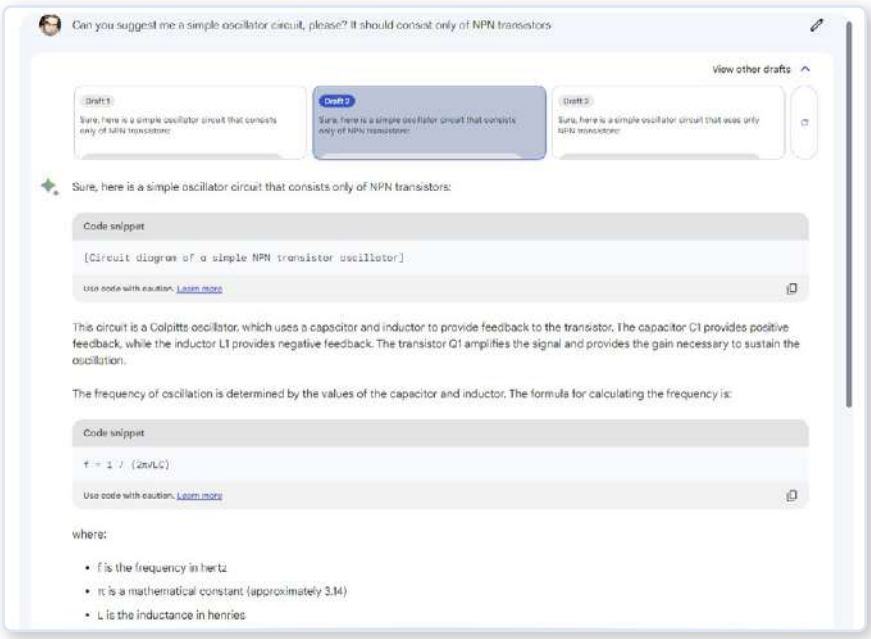


Bild 5. Sowohl beim zweiten ...

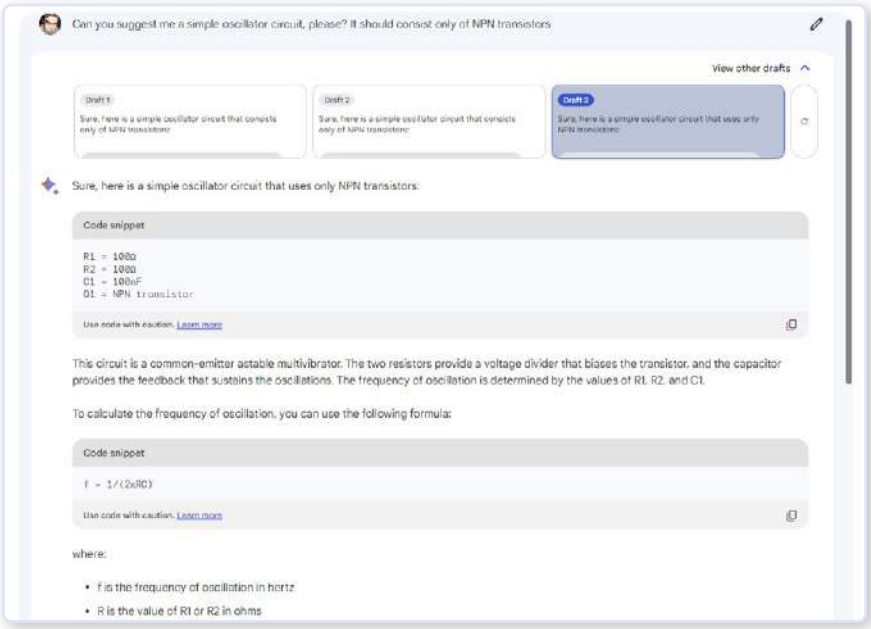


Bild 6.... als auch beim dritten von Bard generierten Ergebnis wird man umfangreich informiert.

Suche nach dem astabilen Multivibrator

Als erste Aufgabe wollen wir - die Buch-Serie „Elektronik gar nicht schwer" lebe hoch - auf die Suche nach einem Astabilen Multivibrator gehen. In der Theorie müsste Google Bard für diese Aufgabe geradezu perfekt vorbereitet sein; eine der wichtigsten Ankündigungen auf dem I/O-Kongress war ja, dass Bard fortan auch zum Zurückgeben von Bildern als Antwort befähigt ist. Die Anfrage lieferte allerdings nur das in **Bild 4** gezeigte (und ob des Fehlens eines grafischen Schaltbilds vergleichsweise wenig befriedigende) Ergebnis zurück.

Immerhin führt der auf der Unterseite befindliche *Google It*-Knopf zu einer Liste häufiger Anfragen, über die man im Zusammenspiel mit dem gelieferten Schlüsselwort über kurz oder lang an einen brauchbaren Schaltplan kommt. Unterm Strich gilt also, dass Bard einen - wenn auch eher kleinen - Teil der Literaturrecherche für den Dienstabenden erledigt.

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch noch, dass Bard, wie in **Bild 5** und **Bild 6** gezeigt, mehrere Varianten des Schaltbildes beziehungsweise der Antwort anbietet. In einer der Varianten findet sich noch ein klassischer Platzhalter für ein Bild. Beide Antwort-Varianten informieren umfangreich über Formeln, die für die Berechnung der Arbeitsfrequenz notwendig sind.

Als Nächstes durfte Flux Copilot sein Glück probieren. Als erstes Hindernis präsentierte sich dabei die korrekte Formulierung der Fragestellung. Wer den Kopiloten nicht dediziert wie in Bild 3 gezeigt taggt, kann die künstliche Intelligenz nicht aktivieren. Erst die dritte Anfrage führte dann zum in **Bild 7** gezeigten Ergebnis. Ganz analog zu Bard gilt, dass Copilot sich auf eine (hier allerdings detailliertere) textuelle Beschreibung der Schaltung beschränkt - ein „schlüsselfertiges" Schaltbild suchte der Autor auch hier vergebens.

Copilot lässt sich beim Reagieren mitunter etwas Zeit. Der Dienst blendet mittlerweile aber die in **Bild 8** gezeigte Meldung ein, die über den aktiven Denkprozess der AI informiert.

tamhan

Can you suggest me a simple oscillator circuit, please? It should consist only of NPN transistors @copilot

Reply Now

copilot

Sure, a simple NPN transistor-based oscillator circuit is the "Astable Multivibrator" which typically uses 2 NPN transistors, 2 capacitors, and 4 resistors. Here's how you can build the circuit:

1. Take two NPN transistors (e.g., 2N3904 or BC547) and connect their collector (C) pins to the positive supply rail (Vcc) through a resistor each. Use resistors R1 and R2 (e.g., 3.3k-10k ohms).
2. Connect the emitter (E) pins of both transistors to the ground.
3. Connect the bases (B) of the two transistors through a resistor each. Name these resistors R3 (e.g., 10k-100k ohms) and R4 (e.g., 1k-10k ohms). R4 should have a lower resistance value than R3.
4. Connect a capacitor (C1) between the base of the first transistor and the collector of the second transistor. Choose a capacitance value like 10uF to 100uF.
5. Connect another capacitor (C2) between the base of the second transistor and the collector of the first transistor. Choose a similar capacitance value as C1.
6. The output can be taken from either collector, but adding a resistor (R_out) between the collector and output can help stabilize the circuit.

This circuit generates a square wave output whose frequency depends on R3, R4, C1, and C2 values. The formula to find the oscillation frequency is:

Frequency = 1 / (1.38 * (R3 + 2 * R4) * C1)

Keep in mind that values provided here are just examples, and you may need to fine-tune the component values depending on your specific needs.

Reply Now

Reply to thread...

Bild 7. Zur Nutzung der Copilot-Hinweise ist noch etwas natürliche Intelligenz erforderlich.

tamhan

@copilot, please wire up the circuit around U1

Reply Now

copilot

Thinking ...

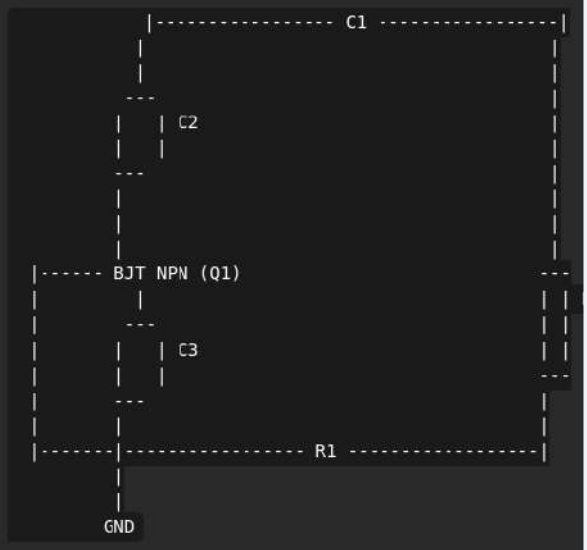
Reply Now

Reply to thread...

Bild 8. Die Meldung informiert über den aktiven Denkprozess der KI.

copilot

Sure, a simple type of oscillator which uses only NPN transistors is a Colpitts oscillator. Here is a basic Colpitts oscillator schematic:



Components:

- Q1: An NPN transistor. For instance, a 2N3904 could be used.
- C1, C2, C3: Capacitors. Values will depend on the desired frequency
- L1: An inductor. Its value will depend on the desired frequency.
- R1: A resistor to control the base current of the transistor.

Note: The values of C1, C2, C3, and L1 should be selected to resonate at th frequency you want the oscillator to work at. The resonant frequency can b calculated as:

[f = \frac{1}{2 \pi \sqrt{LC}}]

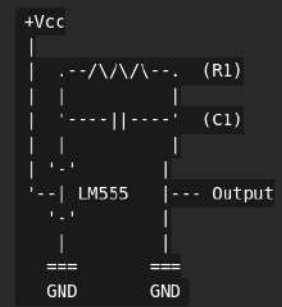
tamhan

@copilot thank you. Can you please add such an oscillator to my design? I want a target frequency of 1KHz

Reply Now

copilot

Sure, we can use a simple RC oscillator circuit for generating a 1KHz signal. Here's a basic design:



For the LM555 timer, the oscillator frequency can be calculated using the formula:

f = 1.44 / ((R1 + 2R2) * C1)

For a frequency of 1kHz, you can choose values for R1, R2, and C1 such that they fit into this equation. For example, choosing R1 = 4.7 kOhms, R2 = 4.7 kOhms, and C1 = 33nF should give you approximately 1kHz.

I will now add these components to your design.

Reply Now

Bild 9. Schaltbild eines Colpitts-Oszillators.



Bild 10. Fragt man nach Schaltreglern, so bekommt man die Bilder der Gehäuse und Datenblätter angeboten.

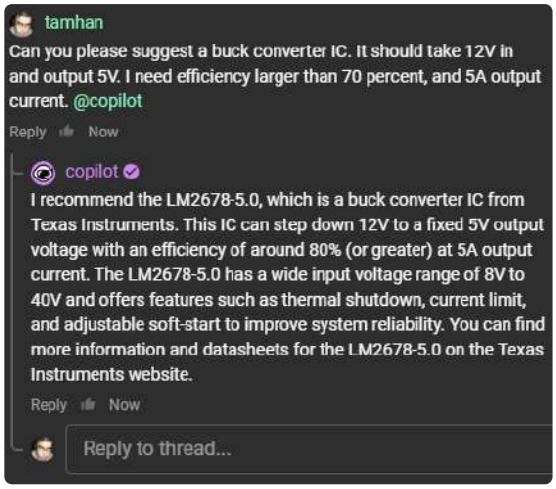


Bild 11. Copilot geht das Schaltregler-Problem eher simpel an.

Wenige Tage vor Druckschluss aktualisierte Flux.ai die Engine. Sie lieferte nun, wie in **Bild 9** gezeigt, das Schaltbild eines Colpitts-Oszillators. Die Bitte, die neuen Komponenten zu einem schon vorhandenen Schaltungs-Design hinzuzufügen, wurde quittiert, doch in der Schematic-Ansicht tauchten die neuen Bauteile indes nicht auf. Nach dem manuellen Hinzufügen verdrahtete der Dienst die Komponenten allerdings problemlos. Zum Zeitpunkt der Drucklegung beschränkt Flux.ai den Copiloten absichtlich darauf, nur vorhandene Komponenten zu verdrahten.

Auf Bauteil-Suche

Nachdem wir mit künstlicher Intelligenz nach einer Oszillator-Schaltung gesucht haben, wollen wir die beiden KI-Systeme im nächsten Schritt zur Suche nach verschiedenen integrierten Schaltkreisen heranziehen.

Als erste Aufgabe begaben wir uns auf die Suche nach einem Buckkonverter-IC, der 12 V in 5 V umwandelt. Interessant ist hier, dass Bard plötzlich - man betrachte das **Bild 10** - zum Zurückgeben von Bildern befähigt war. Google präsentierte drei unterschiedliche, vergleichsweise moderne Komponenten.

Stellt man die Anfrage hingegen Copilot, so bekommt man, wie in **Bild 11** gezeigt, ein simpleres Bauteil zurückgeliefert. Andererseits sei angemerkt, dass das empfohlene IC den Autor seit Jahrzehnten begleitet und im Bezug auf das Design der Schaltung wesentlich anspruchsloser ist als seine moderneren und höherfrequent arbeitenden Kollegen.

Das Verdrahten der von Hand ins Flux-Schaltbild eingefügten Bauteile ging dann unproblematisch. Lustig ist, dass der Dienst manchmal versucht, „intelligent“

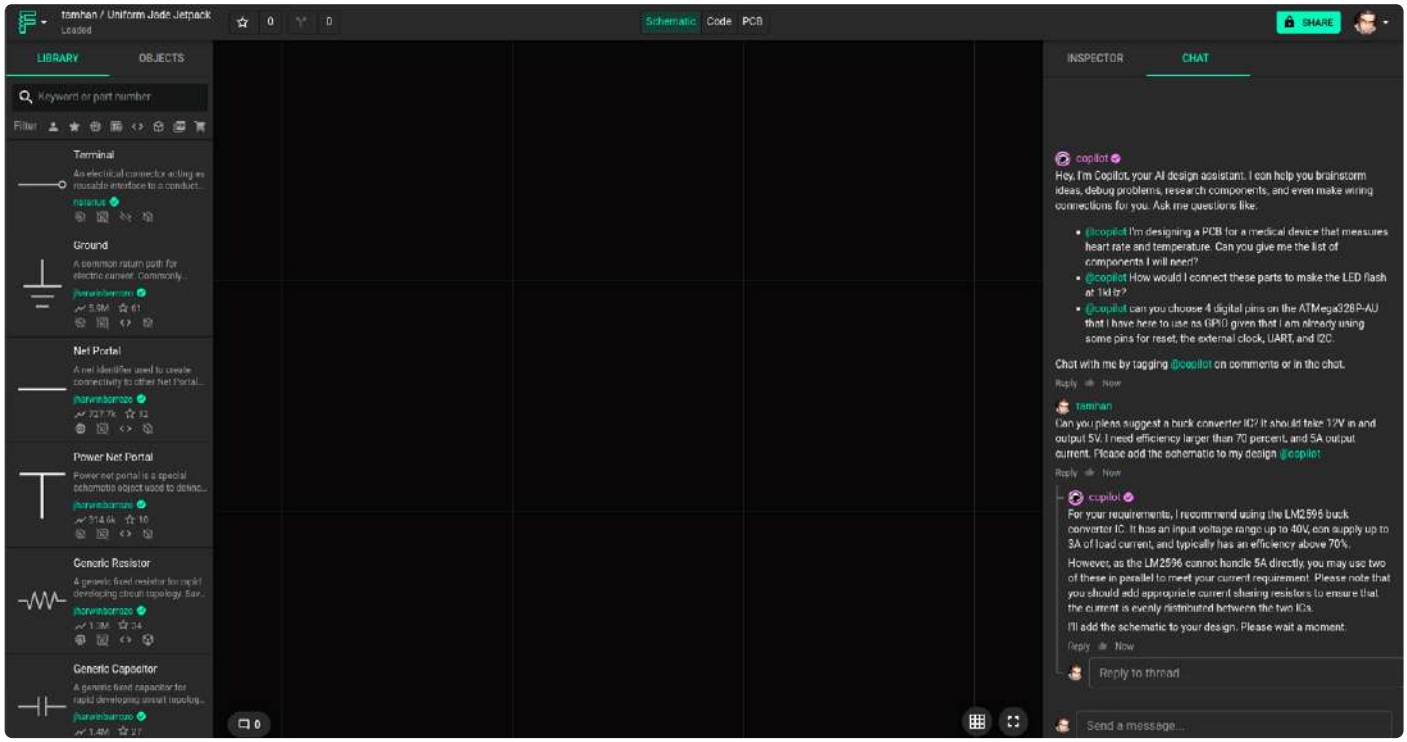


Bild 12. Lustig ist, dass der Dienst manchmal versucht, „intelligent zu sein” und zwei LM2596 parallel zu schalten, um den erforderlichen Strom ausgeben zu können.

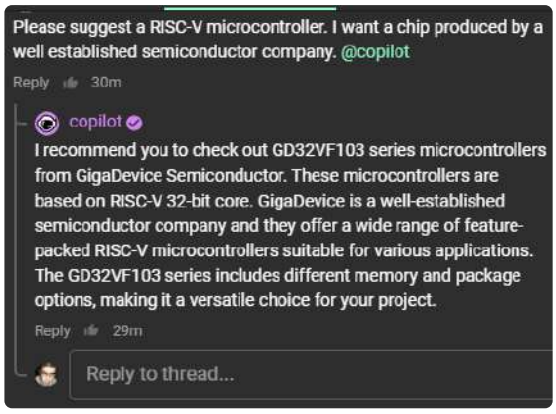


Bild 13. Für Copilot gibt es in diesem Bereich nur GigaDevice.

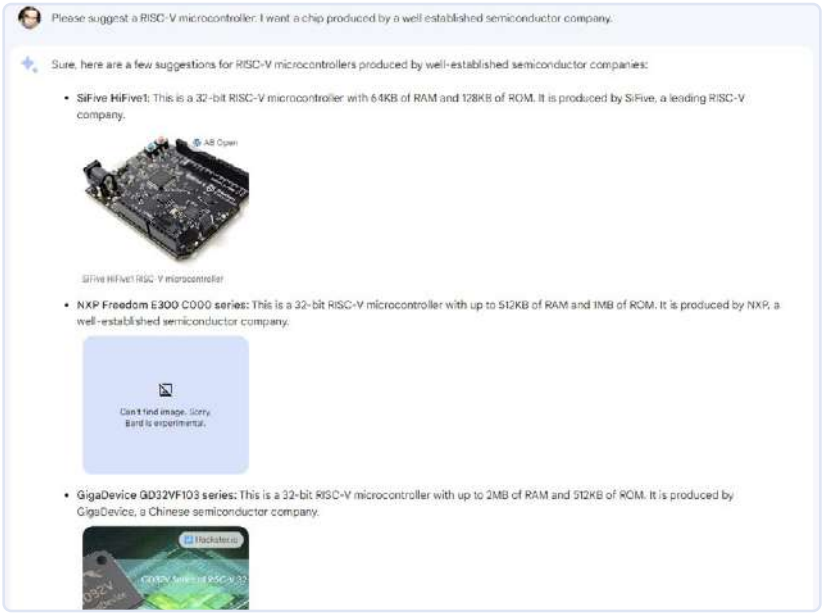


Bild 14. Bard zeigt sich auch bei der RISC-V-Suche…

zu sein und zwei LM2596 (zur Ausgabe von höheren Strömen) parallel schaltete (**Bild 12**). Auch hier gilt, dass das eigentliche Einfügen in eine schon vorhandene Schaltung scheitert.

Da beide Tools bereitwillig je einen Vorschlag generierten, bot es sich an, sie im nächsten Schritt zur „Vertiefung" der jeweiligen Vorschläge zu animieren. Der Autor konfrontierte dabei sowohl Bard als auch Copilot mit sowohl dem eigenen als auch dem fremden Vorschlag. Die Antworten der beiden Systeme fielen dann im Allgemeinen ähnlich aus - keiner der beiden KI-Helfer konnte einen Schaltkreis designen; stattdessen erschienen mehr oder weniger umfangreiche textuelle Beschreibungen der zu erzeugenden Schaltungen.

Als Nächstes bot sich die Suche nach einem RISC-V-Mikrocontroller an. Im Interesse der Langlebigkeit des resultierenden Systems wies der Autor die KI außerdem dazu an, nur etablierte Halbleiter-Hersteller zu berücksichtigen.

In Flux Copilot führte dies, wie in **Bild 13** gezeigt, zu einer kompakten (und nach Ansicht des Autors nachvollziehbaren) Entscheidung, und zwar für einen GigaDevice GD32VF.

Google Bard setzte den schon beim Spannungsregler gezeigten Trend zu einem „weiter gespannten Netz" fort. **Bild 14** und **Bild 15** zeigen die Auswahl von gleich drei Mikrocontroller-Familien; außerdem gibt Bard dem Entscheidungsträger zusätzliche Informationen (für die Auswahl des am besten zu seiner Applikation passenden Chips) zur Hand.



Bild 15. …kommunikativ!



Bild 16. Eine richtige…



Bild 17. …und zwei weniger sinnvolle Antworten.



Bild 18. Wer mit Bard nach LED-Treibern sucht, erleidet Schiffbruch.

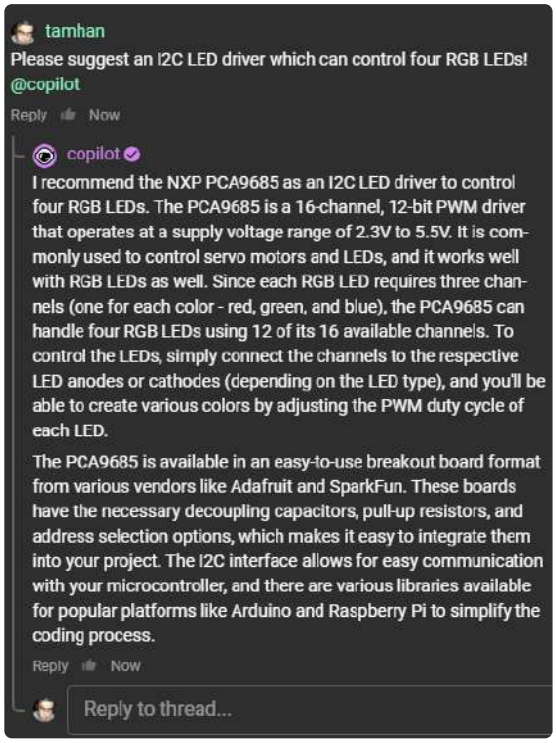


Bild 19. Dieser Punkt geht klar an Flux Copilot!

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch die Frage, wie Bard darauf reagiert, wenn man ihn zur Auswahl eines „sanktionssicheren" Chips animiert. In diesem Fall empfiehlt das System zwar korrekt den GigaDevice GD32VF (**Bild 16**), kann aber auch zwei „Softcores" vorschlagen, die man beim Distributor seines Vertrauens nicht wirklich käuflich erwerben kann (**Bild 17**). Als letzte Aufgabe dieser Art wollten wir dem System eine vergleichsweise komplizierte Aufgabe stellen: Wir suchten nun einen I²C-LED-Treiber, der vier RGB-LEDs (also entweder zwölf oder unter Berücksichtigung einer optionalen weißen Diode sechzehn) Kanäle steuern kann. Bard versagt in diesem Bereich (siehe **Bild 18**). Die empfohlene Komponente kann erstens nur vier Kanäle ansteuern und ist zweitens von einem sehr kleinen Halbleiterhersteller (dass Bard statt Kinetic Technologies ein Vorgängerunternehmen anführt, ist dann nur die Kirsche auf der Torte). Die beiden anderen Ergebnisse sind keine integrierten Schaltkreise, sondern Module.

Auch bei dieser Frage zeigt sich Flux Copilot „defensiver". Das in **Bild 19** gezeigte und ausgewählte NXP-Bauteil erfüllt die Aufgabe vollständig.

Fortgeschrittene Analyse mit Flux.ai

Systeme der künstlichen Intelligenz können - diese Regel gilt mehr oder weniger universell - immer dann die besten Ergebnisse liefern, wenn ihnen eine möglichst tiefe Datenbasis zur Verfügung steht. Als Anbieter eines PCB-Designsystems ist Flux logischerweise in der Lage, die vom Benutzer hochgeladenen Schaltungsdiagramme zu überprüfen. Zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Artikels gilt allerdings, dass Copilot noch nicht zur Validierung von Fehlern im physikalischen Layout der Printplatte befähigt ist.

So verspricht der Anbieter in der Dokumentation beispielsweise, dass Copilot Widerstandswerte berechnet oder korrekte Beschaltungs-Varianten für Pins findet. Es wird ein Beispiel für die Mindest-Beschaltung zur Inbetriebnahme eines Mikrocontrollers gezeigt, also Entkoppelungskondensatoren, Pull-Up- oder Pull-Down-Widerstände und ähnliche „Glue Logic", ohne die der Mikrocontroller nicht in der Lage ist, mit Berechnungen zu beginnen.

Besonders hebt Flux auch die Möglichkeit hervor, im Schaltkreis befindliche Bauteile - man denke beispielsweise an einen Operationsverstärker - zu „parametrieren".

Um das Ganze zu testen, ging der Autor auf die Suche nach einem LM324. **Bild 20** zeigt, dass Flux Copilot nur SMD-Varianten kennt. Immerhin lässt sich der Opamp ohne

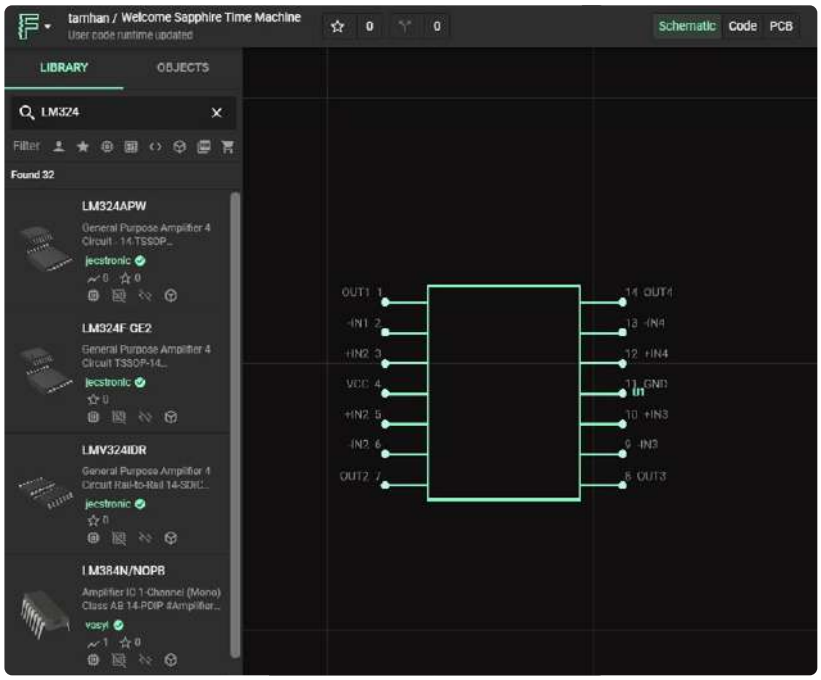


Bild 20. Dieser Operationsverstärker wird sogleich unter Nutzung von Copilot parametriert.

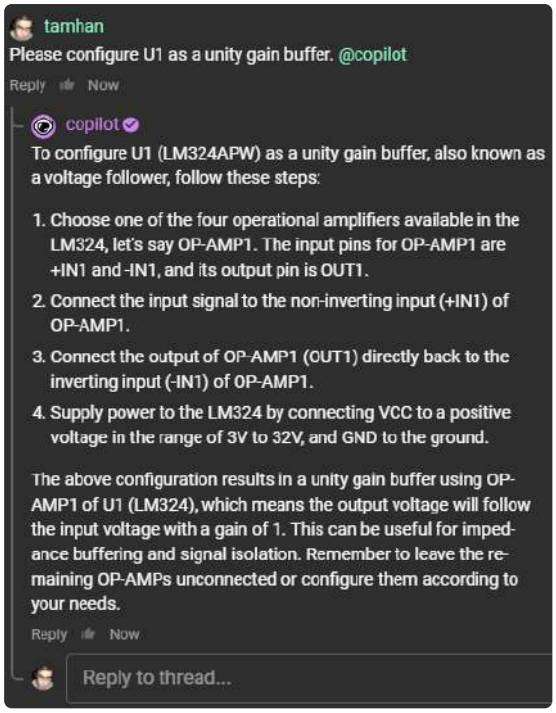


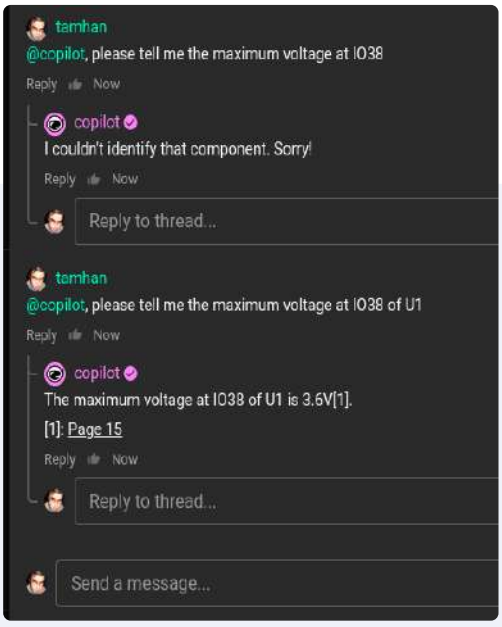
Bild 21. Zur Umsetzung dieser Hinweise ist manuelle Arbeit erforderlich.

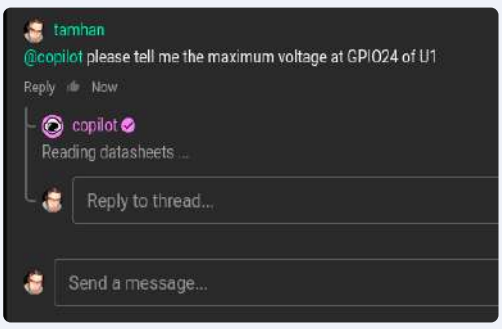
Flux.ai liest Datenblätter

Wenige Stunden vor der Abgabe dieses Artikels lieferte Flux.ai ein neues Feature aus: Copilot soll ab sofort auch zur Analyse von Datenblättern befähigt sein. Das System soll so Fragen beantworten können, beispielsweise nach der an einem Pin erlaubten Maximalspannung.

Der Autor testete dies sowohl mit dem ESP32-S3 als auch mit dem für seine leicht chaotische Dokumentation bekannten RP2040. In beiden Fällen lieferte der Bot die korrekte Antwort – im Fall des RP2040 dauerte die Beantwortung der Frage indes einige Sekunden.

Interessant ist, dass Copilot in diesem Betriebsmodus prinzipiell eine vollständige Qualifikation der Anfrage verlangt. Selbst wenn im gesamten Schaltbild nur ein Pin namens GPIO24 vorhanden ist, findet der Bot das IC nicht selbsttätig.





Außerdem sind die zurückgelieferten Referenzen so gut wie immer falsch: Wer den Links zu den jeweiligen Datenblättern folgt, sollte nach dem Spannungswert suchen und die Seitenangabe links liegen lassen.

großen Aufwand per Drag-and-Drop in die Schaltungs-Ansicht übertragen.

Auf die Anfrage, das Bauteil als Buffer zu konfigurieren, erschienen die in **Bild 21** gezeigten Hinweise. Copilot ist zum Zeitpunkt der Drucklegung nicht gewillt, in den eigentlichen Schaltungs-Designprozess einzugreifen und die vom Benutzer platzierten Komponenten zu modifizieren.

Und jetzt, mit Software

Auch wenn man es insbesondere als dienstalter Elektroniker nicht gerne hört: Moderne (komplexe) Systeme sind nur in Hardware nicht zu realisieren. Ein Mikrocontroller ist heute in vielen Fällen preiswerter (und kleiner sowie leichter) als ein oder zwei Logic-ICs - was schon zur Jugendzeiten des Autors galt, gilt heute noch mehr.

Als Erstes wollten wir Flux Copilot mit einer einfachen Firmware testen, die eine LED blinken lässt. **Bild 22** zeigt, wie die (zugegebenermaßen auf Hardwareentwicklung optimierte und dafür vorgesehene) API auf die Anfrage reagiert, doch bitte etwas Assembler-Code für einen PIC16 zu schreiben.

Bard programmiert ähnlich, wie es **Bild 23** zeigt, nutzt aber weniger Subroutinen. Beiden KI-Codegeneratoren gemein ist indes die vergleichsweise hohe Dokumentationsdichte; wohl ein Entgegenkommen an Entwickler, die beim Debuggen beziehungsweise der Qualitätsicherung so leichter in den generierten Code einsteigen können.

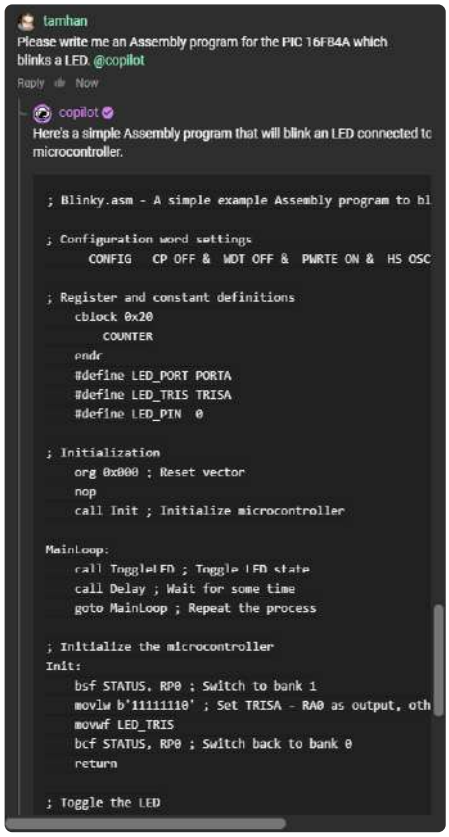


Bild 22. Copilot programmiert munter drauflos.



Bild 23. Auch Bard generiert ein Blink-Programm für den PIC16.

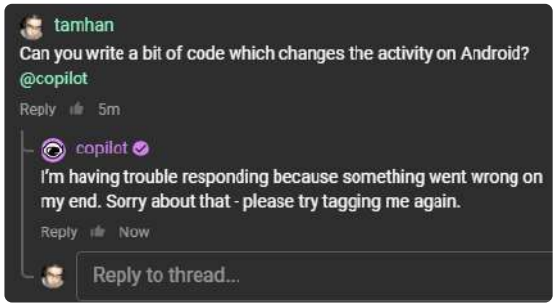


Bild 24. Copilot weiß nichts von Android.

Als nächste Aufgabe folgte eine Auseinandersetzung mit Android: Das System ist nicht nur zur Kommunikation mit einem ESP32, sondern auch in seinen Industrie-Varianten Emteria und (ehemals) Android Things auch für Entwickler von Embedded-Systeme in höchstem Maße relevant.

Copilot ließ die in **Bild 24** gezeigte Anfrage auch einige Minuten später unbeantwortet; offensichtlich war die künstliche Intelligenz hier an die Grenzen ihrer Möglichkeit gekommen.

Für Bard ist die Aufgabe wesentlich einfacher. **Bild 25** zeigt, wie der Bot die zur Activity-Änderung notwendige Codestruktur automatisiert ins Leben ruft.

An dieser Stelle zeigt sich eine grundlegende Schwäche von KI-Systemen. Der auf Anfrage generierte Code funktioniert in vielen Fällen problemlos, wird aber dem Nutzer einfach vor die Füße geworfen. Die Integration des zurückgelieferten Codes in ein System, das dann wirtschaftliche Werte schafft, bleibt Aufgabe des Entwicklers. Nach Ansicht des Autors ist dies einer der Gründe, warum Codierer nicht übermäßig viel Angst davor haben müssen, von Künstlicher Intelligenz ersetzt zu werden.

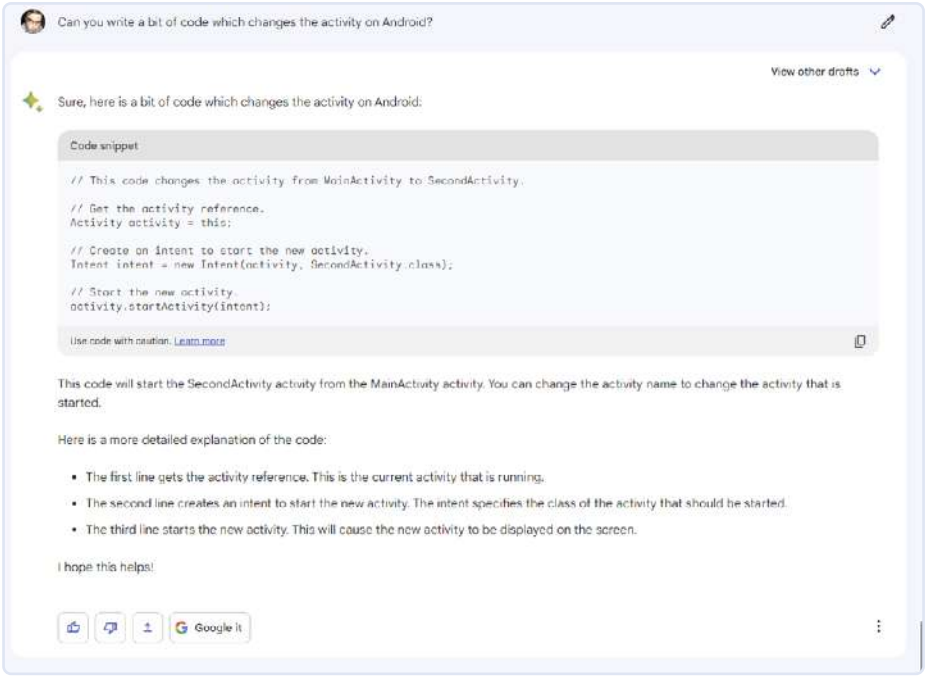


Bild 25. Bard macht mit dem MainActivity-Problem kurzen Prozess.

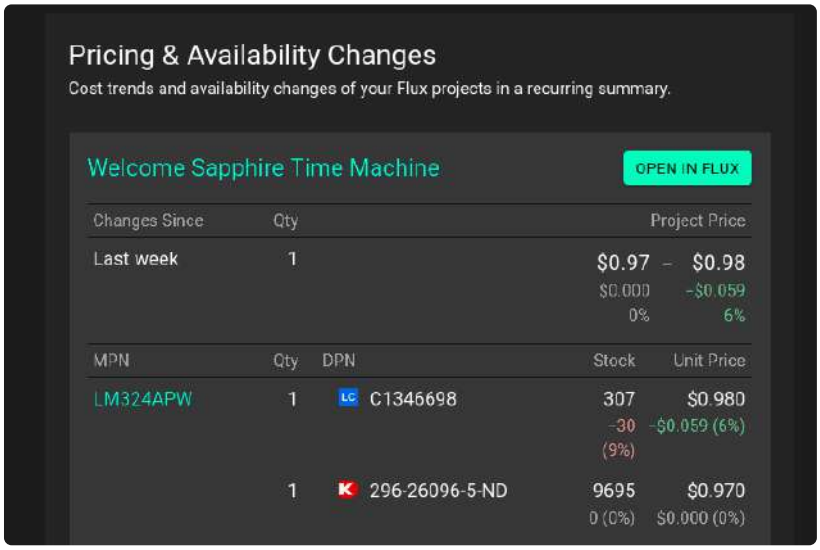


Bild 26. Flux.ai informiert über Komponentenpreisänderungen.

Preis- und Verfügbarkeitsüberwachung mit Flux.ai

Spätestens seit der Chipkrise gilt, dass sich Änderungen an der Bauteilverfügbarkeit mitunter über Nacht ergeben können. Da Flux.ai eine Liste aller in einem Projekt enthaltenen Bauteile vorhält, kann es Designer über Änderungen informieren. Das Start-Up tut dies auch – **Bild 26** zeigt die regelmäßig versendeten E-Mails mit Nachrichten.

Analog zu eToro im Finanzbereich gilt auch im Fall von Flux.ai, dass soziale Funktionen im Bereich der Elektronik im Mittelpunkt der Plattform stehen. So gibt es eine Liste von „besonders empfehlenswerten Projekten", die interessante oder nützliche Schaltungen demonstrieren – ein Slack-Forum erlaubt die Kommunikation mit Dritten.

Zu guter Letzt verdient [4] Aufmerksamkeit: Das dort befindliche Projekt erlaubt Nutzern, Fragen an das Flux-Team zu stellen. Das Ganze ist dabei explizit nicht auf Flux beschränkt, auch allgemeine Fragen zum Schaltungsdesign oder PCB-Layout werden nach Maßgabe der Möglichkeit beantwortet.

Fazit

Unsere hier durchgeführten Experimente haben gezeigt, welche Entwickler-Aufgaben KI-Tools erledigen können, und, was mindestens ebenso wichtig ist, welche Grenzen die zurückgelieferten Ergebnisse noch haben. Da KI in „aktiver Entwicklung" ist, gilt allerdings, dass die beiden Anbieter einige der hier erwähnten Probleme wahrscheinlich bereits ausgemerzt haben, wenn Sie dieses Heft in Händen halten. Der Autor freut sich auf jeden Fall über Lesermails mit Ihren persönlichen Erfahrungen (siehe Kasten **Fragen oder Kommentare**).

Unterm Strich bleibt festzuhalten, dass Künstliche Intelligenz eine Art „Ersthelfer" darstellt. Wer beispielsweise Bard verwendet, hat (schon wegen der schnellen Reaktionsfähigkeit) nur wenig zu verlieren, wenn er Rechercheaufgaben auch an Google's Assistenten delegiert. Dass eine detaillierte Prüfung der zurückgelieferten Ergebnisse auf jeden Fall notwendig ist, folgt schon aus den hier gemachten Erfahrungen. Job-Angst braucht man jedenfalls, insbesondere als diensterfahrener Elektroniker, auf keinen Fall zu haben.

230378-02

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Gerne können Sie sich an den Autor unter der E-Mail-Adresse tamhan@tamoggemon.com oder an die Elektor-Redaktion unter der E-Mail-Adresse redaktion@elektor.de wenden.

WEBLINKS

[1] Bard: Liste der erlaubten Aufenthaltsorte: https://support.google.com/bard/answer/13575153?hl=en
[2] Google Bard: https://bard.google.com/
[3] Flux Copilot: https://www.flux.ai/p
[4] Flux: Ask An Expert: https://www.flux.ai/nico/ask-a-flux-expert



Funktionsgenerator mit dem Arduino Nano

Nano + Code = Funktionsgenerator

Von Michael J. Bauer (Australien)

Dies ist kein komplettes DIY-Projekt mit einer Platine. Der vielleicht reizvollste Aspekt dieses Projekts ist die Firmware und die Code-Bibliothek für die Peripherie, die viele nützliche Techniken für eingebettete Echtzeitanwendungen enthalten, entwickelt von einem professionellen Ingenieur mit jahrzehntelanger Industrieerfahrung.

Funktionsgeneratoren sind seit den ersten Jahren von Elektor beliebte DIY-Projekte. Dieser hier basiert auf einem Arduino Nano und ist daher eher ein Low-End-Typ, was Komplexität und Baukosten angeht. Dennoch steckt so viel Power in einem 8-Bit-AVR-Mikrocontroller, dass er sich als nützliches Instrument zum Testen von Audio- und Low-Speed-Digitalgeräten erweisen kann.
Die Teile der Schaltung sind in einem kleinen Kunststoffgehäuse (130 × 70 × 40 mm) untergebracht, so dass das Gerät leicht zu transportieren ist. Die Stromversorgung erfolgt mit 5 V über USB. Alle für den Bau dieses Generators benötigten Teile sind zu lächerlich niedrigen Preisen erhältlich.

Modi

Modus „Wave“

Wellenformen:	Sinus, Dreieck, Rechteck, Sägezahn und Rauschen
Frequenz:	niedrig 1...100 Hz (12 Schritte); hoch 80 Hz...8 kHz (18 Schritte) oder 50 Hz...5 kHz, kontinuierlich
Rauschen:	Gefiltert bei 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz, 800 Hz, 1.600 Hz, 3.200 Hz oder ungefiltert (weiß)
Ausgangskopplung:	AC oder DC
Ausgangspegel:	100 mV_{SS}, 200 mV_{SS}, 500 mV_{SS}, 1 V_{SS}, 2 V_{SS} oder 4 V_{SS}
DAC-Auflösung:	8 mV_{SS}/Bit

Modus „Pulse“

Frequenz:	niedrig 1...1000 Hz (16 Schritte); hoch 1 kHz...4 MHz (16 Schritte)
Tastverhältnis:	≈1...99 % variabel (256 Schritte)
Ausgangspegel:	3,3 V oder 5 V; 20 mA Quelle/Senke (bei 5 V)

Der Entwurf

Das Projekt basiert auf dem Board Arduino Nano v3 und einem LCD-Modul (Typ 1602A) mit zwei Zeilen á 16 Zeichen und LED-Hintergrundbeleuchtung, vier Drucktasten und einem Potentiometer. Mit diesem Poti lässt sich entweder die Signalfrequenz oder das Tastverhältnis einstellen, je nach gewähltem Ausgangsmodus. Bei den Ausgangsanschlüssen handelt es sich um Cinch-Buchsen für Gehäusemontage.
Der Entwurf nutzt einen integrierten Timer des ATmega328P, um Impulse mit variablem Tastverhältnis an einem Ausgangspin zu erzeugen (siehe **Kasten Modi**). Im Wave-Modus wird ein 32-kHz-PWM-Ausgangssignal des Controllers verwendet, um daraus Signale im Audiobereich bis zu 8 kHz zu erzeugen. Dabei kann zwischen den Wellenformen Sinus, Dreieck, Rechteck und Sägezahn gewählt werden. Diese Signale werden durch einen Wavetable-Oscillator-Algorithmus in der Firmware erzeugt (keine Sorge, wir kommen darauf zurück!). Der 8-Bit-DAC ermöglicht eine Auflösung der Amplitude von 0,4 % des Skalenendwerts.
Die Samplefrequenz von 32 kHz wird mit Hilfe eines analogen Tiefpassfilters dritter Ordnung mit einer Steilheit von -18 dB/Oktave und einer Grenzfrequenz von 8 kHz rigoros aus dem Ausgangssignal entfernt. **Bild 1** enthält Bildschirmfotos verschiedener Wellenformen dieses Generators.

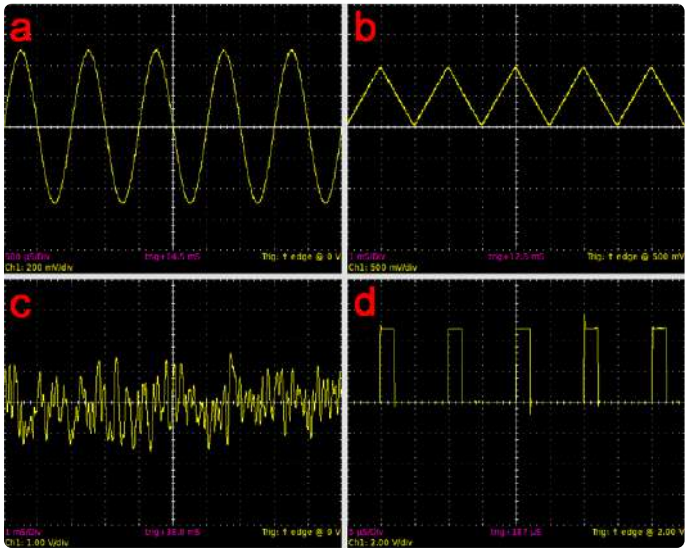


Bild 1. Screenshots von Wellenformen: a) Sinus 1 kHz, 1 V_{SS}, AC-Ausgang; b) Dreieck 500 Hz, 1 V_{SS}, DC-Ausgang; c) Rauschen, ungefiltert, 4 V_{SS}, AC-Ausgang; d) Impuls, 100 kHz, Tastverhältnis = 20%, 5-V-Ausgang.

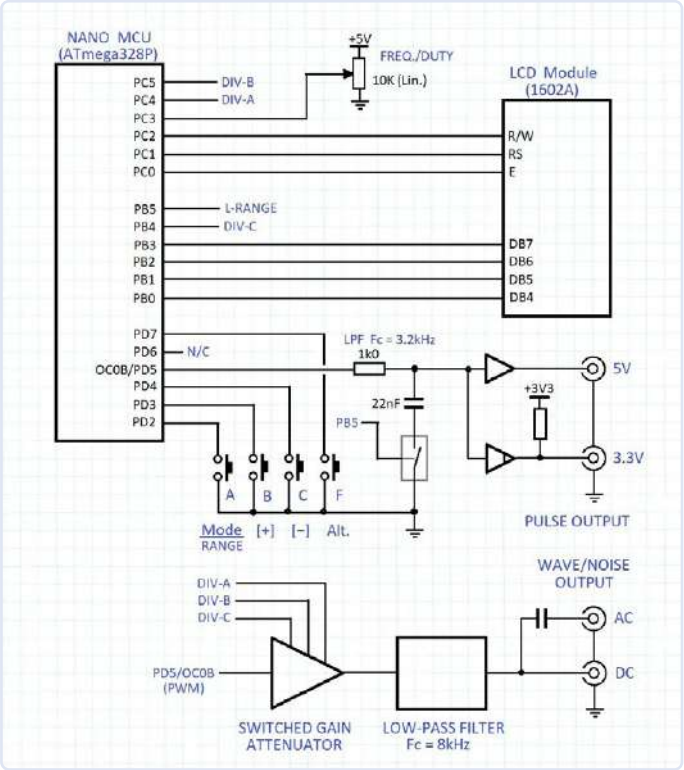


Bild 2. Vereinfachte Schaltung des Funktionsgenerators auf der Grundlage eines Arduino Nano.

Vereinfachte Schaltung

Bild 2 zeigt ein vereinfachtes Schaltbild des Generators. Im Wave-Modus wird der Ausgangspegel mit einem geschalteten Abschwächer zwischen dem PWM-Ausgangspin und dem Opamp-Tiefpassfilter auf einen von sechs Werten eingestellt. Der Abschwächer besteht aus drei Analogschaltern (74HC4066), die vom Mikrocontroller gesteuert werden, gefolgt von einem Puffer-Opamp (ein halber MCP602).

Im niederfrequenten Impulsmodus verwendet der Generator die gleiche 32-kHz-Abtastfrequenz wie im Wellenmodus, um Impulse mit variablem Tastverhältnis zu erzeugen. Ein einfaches RC-Filter erster Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 3,2 kHz entfernt den größten Teil der 32-kHz-Signalreste. Ein Puffer (74HC125) wandelt das analoge Signal in ein digitales um und eliminiert alles, was an 32-kHz-Resten noch übrig geblieben ist. Das resultierende Signal hat nun schnelle Anstiegs- und Abfallgeschwindigkeiten und kann digitale Schaltungen direkt ansteuern.

Im hochfrequenten Impulsmodus erzeugt das MCU-Timermodul direkt ein Signal mit variabler Frequenz und Tastverhältnis. Der RC-Filter wird durch Öffnen eines Schalters (74HC4066) abgeschaltet. Das Ausgangssignal wird mit Hilfe mehrerer parallel geschalteter Gatter gepuffert (Vierfacher „Tri-state-Buffer" 74HC125). Dadurch kann der Ausgang enorme 20 mA abgeben und aufnehmen (bei 5 V). Die verbleibenden zwei Gatter besitzen einen 1-kΩ-Pull-up-Widerstand nach +3,3 V, so dass ein Impuls-Ausgangspegel von ebenfalls 3,3 V verfügbar ist. Diese Lösung ist einfach, aber nicht optimal, weil die Anstiegszeiten bei höheren Frequenzen zu wünschen übrig lassen. Die Schaltung ist detailliert in **Bild 3** dargestellt.

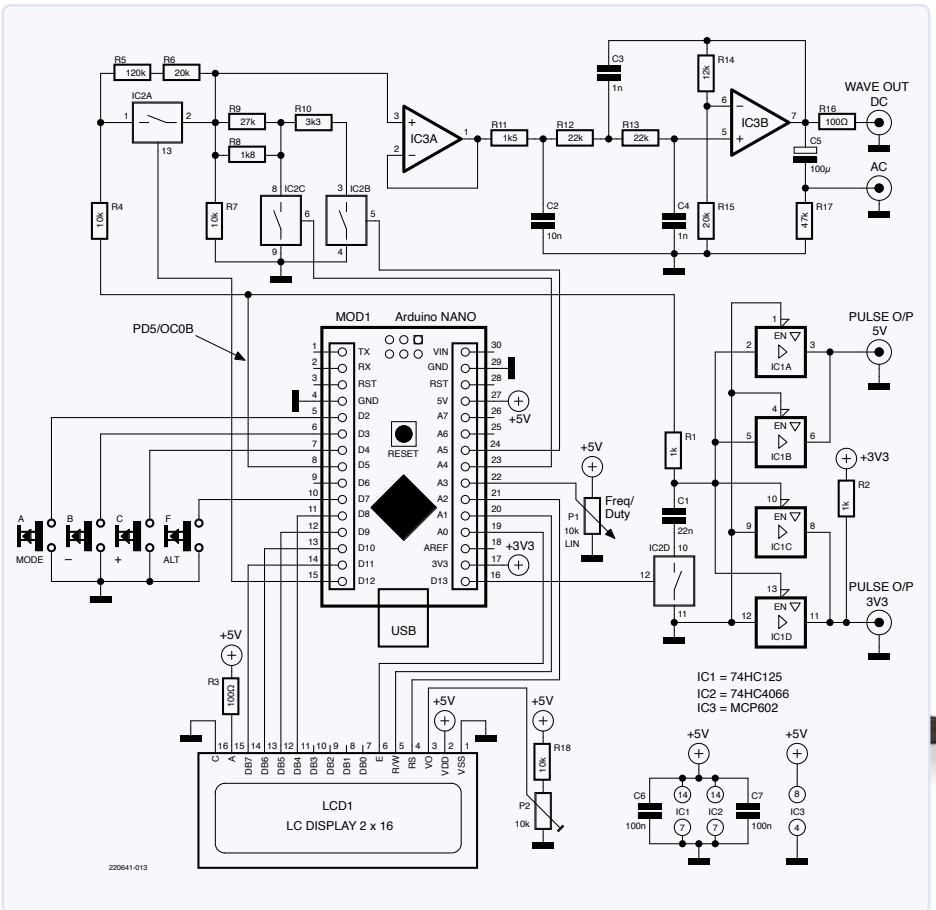


Bild 3. Die detaillierte Schaltung ist nicht viel komplizierter als die vereinfachte Version aus Bild 2.

Bedienfeld

Das gewünschte Ausgangssignal wird mit der *MODE*-Taste durch Blättern durch die verfügbaren Optionen ausgewählt (siehe **Bild 4**). In den Modi Sinus, Dreieck, Sägezahn und Rechteck kann mit dem Poti *FREQ/DUTY* die Ausgangsfrequenz (*Fo*) eingestellt werden. Im Rauschmodus wird das Poti zur Einstellung der Grenzfrequenz des Rauschfilters verwendet. In den Modi Sinus, Dreieck, Sägezahn, Rechteck und Impuls kann man mit den Tasten *FREQ+* und *FREQ-* durch eine Reihe von voreingestellten Frequenzen auf- oder abwärts blättern. Mit dieser Methode lässt sich die Signalfrequenz viel genauer einstellen als mit dem Poti. Außerdem wurden die festen Frequenzwerte so gewählt, dass das Ausgangssignal keine Aliasing-Artefakte aufweist.



Bild 4. Frontplatte des Prototyps des Autors mit Display, Tasten und Potentiometer.



Bild 5. Die gesamte Elektronik ist in einem Kunststoffgehäuse untergebracht. Das Arduino-Board links ist so angebracht, dass der USB-Anschluss von außen erreichbar ist.

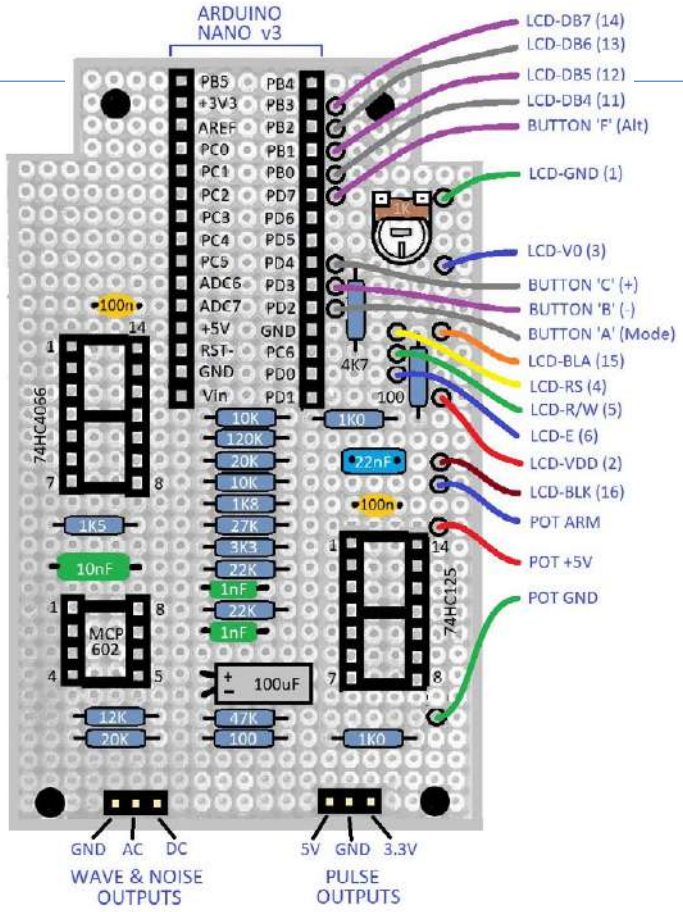


Bild 6. Oberseite der Prototyp-Platine mit den genauen Positionen der Bauteile und Buchsen.

Im Impulsmodus wird mit dem Poti die Impulsbreite eingestellt. Der Wert wird quantisiert, um eine „gerundete" genaue Einstellung zu erhalten, so dass keine kontinuierliche Einstellung möglich ist. Die Auflösung ist von der Frequenz abhängig. Bei hohen Frequenzen sind die Pulsbreitenwerte grob, bei niedrigeren Frequenzen feiner abgestuft. Die Impulsbreite wird als Prozentsatz der Periode angezeigt.

Wenn die *ALT*-Taste gedrückt gehalten wird, werden alternative Funktionen für die anderen drei Tasten aktiviert. Um den Frequenzbereich auszuwählen, halten Sie die Taste *ALT* gedrückt und drücken gleichzeitig auf *RANGE*, um zwischen hohem und niedrigem Bereich umzuschalten. Zur Einstellung des Ausgangssignalpegels in allen Modi (mit Ausnahme des Impulsmodus) halten Sie die Taste *ALT* gedrückt, während Sie mit *LEVEL+* oder *LEVEL-* durch die verfügbaren Pegel blättern.

Aufbau

Wie bereits erwähnt, wurde für diesen Funktionsgenerator kein Platinenlayout entwickelt. Stattdessen ist die Elektronik auf einer doppelseitigen und durchkontaktierten Lochraster-Platine mit isolierten Lötpads im 0,1"-Raster aufgebaut, wie **Bild 5** zeigt. Ich habe ein Stück von 55 × 90 mm mit 21 × 34 Pads verwendet. Wenn das Gehäuse in den Ecken Schraubdome besitzt, müssen zwei Ecken der Platine so ausgeschnitten werden, dass die kurze Seite bündig mit einem Ende des Gehäuses abschließt. Grund: Die USB-Buchse des Arduino Nano befindet sich auf dieser Seite und muss natürlich von außen erreichbar sein.

Die Platine wird auf vier 5-mm-Abstandshaltern an der Unterseite des Gehäuses befestigt. Wenn Sie die Abstandsröllchen in das Gehäuse kleben, bleiben sie an Ort und Stelle, wenn Sie später die Schrauben einsetzen. Die vier Drucktaster werden auf ein weiteres Stück Protoplatine gelötet, das an der oberen Abdeckung unterhalb des LCD-Moduls angebracht ist. Bevor Sie die Taster anlöten, bohren Sie 2 mm-Löcher in die Platine, und zwar in der Mitte jedes Tasters.

In **Bild 6** sehen Sie, wie die Bauteile auf die Prototyp-Platine gelötet werden. Die Verdrahtung auf der Unterseite der Platine ist etwas komplizierter und erinnert an die einstige Fädeltechnik: **Bild 7** zeigt die grundlegende Verdrahtung mit blankem, verzinntem Kupferdraht entlang der äußeren Pads um den Platinenrand herum, natürlich nicht durch die Montagelöcher. Dies ist die Masseschiene (GND). Verbinden Sie alle Masseanschlüsse aller Bauteile mit blankem,

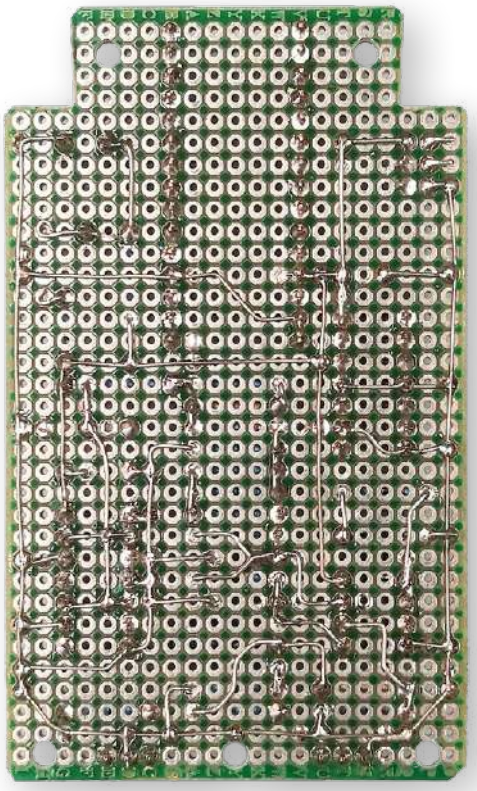


Bild 7. Unterseite der Prototyp-Platine mit der Grundverdrahtung mit verzinntem Kupferdraht.

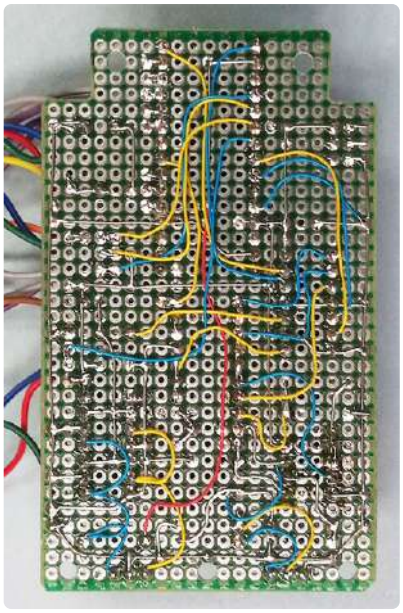


Bild 8. Unterseite der Prototyp-Platine mit zusätzlichen Litzen und Anschlussdrähten.

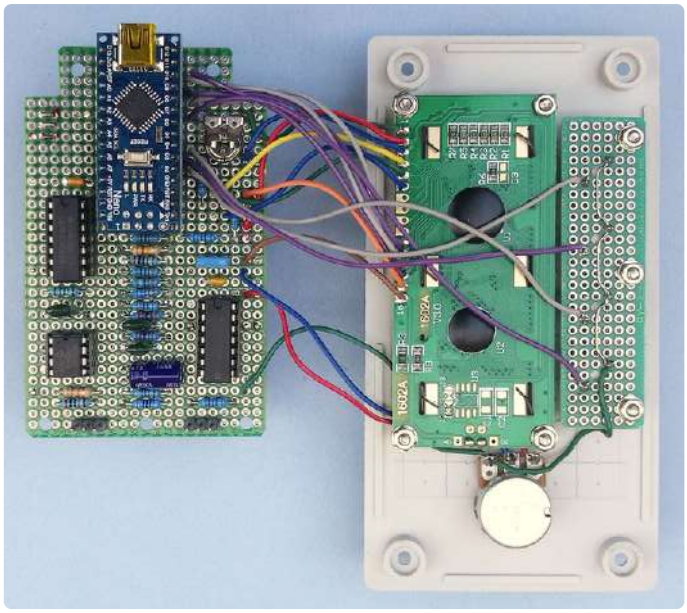


Bild 9. Komplette Prototyp-Platine mit Arduino Nano, angeschlossen an das Display, den Tasten und einem Potentiometer, bereit für einen ersten Test.

verzinntem Kupferdraht (0,5 mm), wie in der Abbildung gezeigt. Die meisten Verbindungen zu V_{CC} (+5 V) können auch mit diesem blanken Draht hergestellt werden, wobei Sie natürlich vermeiden müssen, dem Massedraht ins Gehege zu kommen. Die übrigen Verbindungen können mit kurzen Stücken dünner isolierter Drähte hergestellt werden, wie in **Bild 8** gezeigt. Verschiedene Farben helfen, dabei den Überblick zu behalten!

Nachdem Sie die Platine anhand des Schaltplans überprüft haben, schließen Sie das LCD-Modul, die Drucktasten und das Poti an die Platine an. Die einfachste und zuverlässigste Methode ist es, Litzen direkt an die Platine zu löten. Setzen Sie dann das Arduino-Nano-Modul und die ICs in ihre Fassungen ein. Stellen Sie das Trimmpoti für den LCD-Kontrast in etwa auf die Hälfte ein. Montieren Sie die Platinen in der Box wie in **Bild 9** gezeigt.

Jetzt ist es Zeit für einen „Rauchtest". Schließen Sie den Arduino Nano über den USB-Anschluss an eine 5-V-DC-Stromquelle an. Die LCD-Hintergrundbeleuchtung sollte dabei eingeschaltet sein. Wenn die Gleichspannungen korrekt sind und kein Rauch austritt, sollte die Platine für den Test mit der Firmware bereit sein.

Installation der Firmware

Die Firmware wurde mit dem *Microchip Studio für AVR und SAM Devices* (früher einfach Atmel Studio) entwickelt. Der Hauptgrund für diese IDE (anstelle von Arduino) ist, dass das Hardwaredesign des Funktionsgenerators nicht mit den verfügbaren Arduino-Codebibliotheken kompatibel ist. Insbesondere das 1602A-LCD-Schnittstellenschema (Zuweisung der I/O-Pins der MCU) scheint von keiner Arduino-Bibliothek unterstützt zu werden.

Die Programmierung des ATmega328P kann auch ohne Microchip Studio und Hardware-Programmiertool durchgeführt werden. Der alternative Weg ist im **Kasten Eigene Firmware…** beschrieben. Der Arduino Nano verfügt nämlich über eine USB-seriell-Brücke und einen AVR-Bootloader. Die Windows-Anwendung AVRDUDE [1] kommuniziert mit dem Bootloader über USB, um Firmware in den Flash-Speicher der MCU unterzubringen. Nachdem Sie Ihren Arduino Nano an einen PC angeschlossen haben, öffnen Sie den Geräte-Manager von Windows und klicken Sie auf Anschlüsse (*COM & LPT*). Sie sollten den Nano als serielles USB-Gerät aufgelistet sehen. Notieren oder merken Sie sich die Nummer des zugehörigen COM-Ports, weil sie diese in der Befehlszeile von AVRDUDE angeben müssen. Sie ahnen es, die Programmierung erfolgt über die *Windows-Eingabeaufforderung* (cmd.exe), was aber mit einer einzigen Befehlszeile erledigt ist. Zugegeben, die AVRDUDE-Befehlszeile ist recht lang und muss an Ihre spezielle PC-Software und COM-Port-Zuweisung angepasst werden.

Kopieren Sie deshalb die nachstehende Befehlszeile und fügen Sie sie am besten in einen Texteditor wie Notepad ein (oder geben Sie sie direkt im Terminalfenster ein). Achten Sie darauf, alle Zeilenumbrüche zu löschen, damit der Befehl in einer einzigen Zeile steht. Ein beliebter Fehler, der einen zum Wahnsinn treiben kann, ist auch, wenn Anführungszeichen vom Editor automatisch in „typografische" verwandelt werden und man dies nicht erkennt. Die Datei *Program Nano.bat*, die diese Befehle enthält, befindet sich in der Archivdatei, die Sie kostenlos von der Elektor-Website zu diesem Artikel herunterladen können [2]. Wählen Sie im *Ansicht*-Menü von Notepad die Option *Zeilenumbruch* aus, um die Lesbarkeit zu verbessern. Hier ist die Befehlszeile:

```
avrdude.exe -C avrdude.conf -p atmega328p -c arduino -P
COM4 -b 115200 -U flash:w:nano-wave-gen-v1.5.hex:i
```

Die fett hervorgehobenen Argumente müssen bearbeitet werden, um sie an Ihren PC und die zu programmierende Firmware-Version anzupassen: Ersetzen Sie COM4 durch den tatsächlichen COM-Port, an dem Ihr Arduino Nano angeschlossen ist, wie Sie ihn im Geräte-Manager gefunden haben. Es ist sehr ärgerlich, dass sich der zugewiesene COM-Anschluss ändern kann, wenn das USB-Kabel abgezogen und wieder eingesteckt wird. Das liegt daran, dass eine USB-seriell-Verbindung über einen „virtuellen seriellen Anschluss" und nicht über einen physischen Anschluss hergestellt wird. Der Name der Firmware-Datei aus [2] wird etwa *nano-wave-gen-v1.5.hex* lauten, wobei sich die Version ändern kann. Bearbeiten Sie die AVRDUDE-Befehlszeile also so, dass der fette Hex-Dateiname derselbe ist wie der heruntergeladene. Speichern Sie die bearbeitete Befehlsdatei als *Program Nano.bat*.

Hinweis: Einige billige Arduino Nano-Board-Klone verwenden eine nicht standardmäßige Baudrate für den seriellen Bootloader, die 57.600 Baud betragen kann. Wenn AVRDUDE eine Fehlermeldung ausgibt, versuchen Sie, eine andere Baudrate zu verwenden. Ersetzen Sie in diesem Fall in der Befehlszeile *115200* durch *57600*.

Funktionsprinzip

Die verwendete Technik hinter der Wellenformerzeugung wird „Wavetable-Synthese“ genannt. Eine Wavetable ist ein Array von Daten, die einen vollen Zyklus (eine Periode) einer Wellenform darstellen. Die Array-Elemente enthalten die Signalamplituden zu jedem einzelnen Sample. Die MCU gibt die Abtastwerte mit einer festen Frequenz, der so genannten Abtastrate (Sample Rate) aus, die (viel) höher sein muss als die maximale Frequenz im Ausgangssignal. Als Faustregel sollte man einen Faktor von vier verwenden. Um Audiosignale bis 10 kHz zu erzeugen, ist beispielsweise eine Abtastrate von ≥40 kHz erforderlich. Der Einfachheit halber wird aufgrund der MCU-Taktrate von 16 MHz die niedrigere Abtastrate von 32 kHz gewählt.

Die Firmware verwendet das On-Chip-Timer/Counter-Modul TC0 des ATmega328P im PWM-Modus, um beliebige Wellenformen im hörbaren und subakustischen Frequenzbereich zu erzeugen. Die Wavetable enthält das Tastverhältnis eines PWM-Ausgangssignals. Dieses noch digitale PWM-Signal durchläuft ein Tiefpassfilter, das das PWM-Signal auf einen analogen Spannungspegel mittelt, der die in der Wavetable gespeicherte Wellenform entspricht, wenn auch mit einer Phasenverzögerung.

Die Eckfrequenz des Filters von 8 kHz entfernt die 32-kHz-Impulsfrequenz so weit wie möglich, so dass nur noch die gewünschten Audiofrequenzkomponenten im Ausgangssignal vorhanden sind. Der PWM-Signalausgang in Verbindung mit dem Tiefpassfilter arbeitet als Digital-Analog-Wandler (DAC), wodurch Kosten und Mühen für ein separates DAC-IC eingespart werden. **Bild 10** zeigt das Funktionsprinzip bei der Erzeugung eines PWM-Signals aus einer Wavetable mit Sinusdaten im oberen Bildschirmteil und der resultierenden Wellenform nach der Tiefpassfilterung im unteren Teil.

Timer-Funktionen in der Firmware

Nicht nur die programmierfertige Hex-Datei, sondern der komplette Quellcode ist in der Firmware-Archivdatei unter [2] zu finden. Wenn Sie sich dafür interessieren (und das sollten Sie!), wie dieses Stück Software einen Arduino Nano in einen Funktionsgenerator verwandelt, werfen Sie bitte einen Blick in den Code.

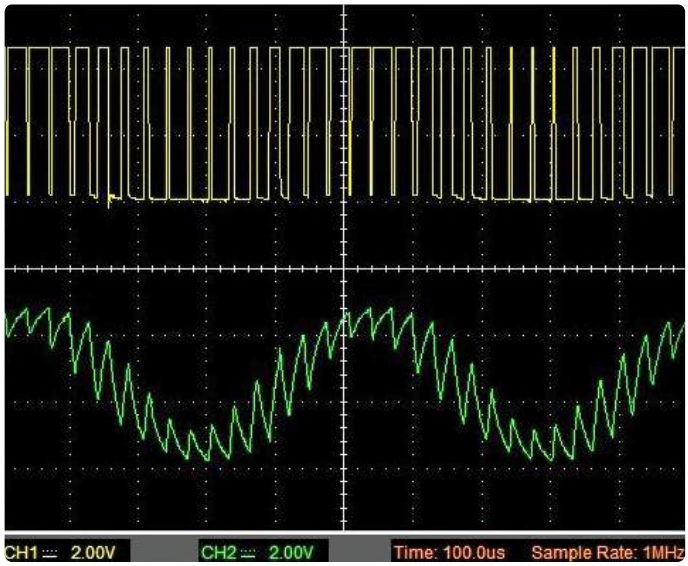


Bild 10. Oben ist das PWM-Signal einer 2-kHz-Sinuswelle zu sehen. Nach der Tiefpassfilterung erscheint die unten gezeigte Wellenform am Ausgang.

Die Funktion `TC0_setup()` initialisiert den Timer-Counter TC0 im „Dual Slope“-Modus (auch bekannt als phasenkorrekter PWM-Modus), um ein Rechtecksignal mit variablem Tastverhältnis am Pin OC0B (= PD5) zu erzeugen. Mit dem Output Compare Register A von Timer TC0 wird ein periodischer Interrupt mit einer Abtastrate von 32 kHz erzeugt, so dass der Abstand zwischen zwei IRQs 31,25 µs beträgt. Die Interrupt-Service-Routine (ISR) muss also alle 31,25 µs eine Abtastung abrufen, verarbeiten und ausgeben. Dies ist für eine 8-Bit-MCU der unteren Leistungsklasse eine ziemliche Herausforderung, aber bei einer Taktfrequenz von 16 MHz können bis zu 16 Anweisungen in 1 µs ausgeführt werden. So lassen sich in der ISR bis zu 16 × 31,25 = 500 Befehle ausführen. Das ist genug Rechenleistung und es besteht keine Notwendigkeit, Assembler zu verwenden.

Natürlich kann die MCU nicht die gesamte Zeit in der ISR verbringen, da sonst nichts anderes in der Hauptschleife (im Hintergrund) ausgeführt würde. Wir müssen dafür sorgen, dass die maximale Ausführungszeit der ISR bedeutend kürzer ist als das IRQ-Intervall. Eine gute Wahl ist es, die Hälfte des IRQ-Intervalls der ISR als Ausführungszeit zu spendieren.

Der Timer-Takt-Prescaler ist deaktiviert (N = 1), um die höchstmögliche Taktrate zu erhalten. Bei einer Taktrate von 16 MHz wird das Register OCR0A für eine Timer-Periode von 250 Takten (in jeder Richtung - aufwärts und abwärts) auf 249 gesetzt, so dass die PWM-Ausgangsfrequenz genau 32 kHz beträgt. Das Output-Compare-B-Register OCR0B erzeugt ein PWM-Ausgangssignal an Pin PD5/OC0B. Das PWM-Tastverhältnis wird proportional zur Abtastamplitude variiert und bei jeder Abtastung (alle 31,25 µs) durch den ISR Timer Output Compare A aktualisiert.

Wenn das Zählerregister TMR0 seinen „TOP count“ (OCR0A = 250) erreicht, wird die Zählrichtung umgekehrt und ein IRQ-Flag (OCA) ausgelöst. Gleichzeitig wird der PWM-Ausgangspin PD5/OC0B auf High gesetzt. Wenn TMR0 mit dem OCR0B-Wert übereinstimmt, wird der Pegel am Pin PD5/OC0B automatisch auf Low gesetzt. Das Tastverhältnis des PWM-Impulses ist daher proportional zum OCR0B-Wert. Das Tastverhältnis kann natürlich nicht größer sein als die Periode, daher wird das maximale Tastverhältnis (100 %) durch das Schreiben von 249 in OCR0B erreicht. Eine detailliertere Erklärung der PWM-Signalerzeugung mit einem AVR-Mikrocontroller liefert das Datenblatt des ATmega328P [3] im Abschnitt über den 8-Bit-Timer/Counter TC0.

Wavetable-Algorithmus

Der Wavetable-Algorithmus arbeitet, indem er Samples aus einer Wavetable mit der festen Abtastrate von 32 kHz abruft. Die Frequenz des Ausgangssignals wird durch den „Abstand“ der aus der Wavetable entnommenen Punkten, also den Phasenwinkel bestimmt. Je kürzer der Abstand ist, desto niedriger ist die Ausgangsfrequenz. Wenn der Tabellenindex des nächsten abzurufenden Wertes über das Ende der Tabelle hinausgeht, wird der Index so angepasst, dass er zu einem Punkt innerhalb der Tabelle läuft, wobei der korrekte Probenabstand beibehalten wird.

Der Abstand zwischen den Abtastpunkten wird „Phasenwinkelschritt“ genannt, der für die meisten praktischen Zwecke eine reelle Zahl sein, also sowohl einen ganzzahligen als auch einen gebrochenen Teil haben muss. Fließkomma-Arithmetik würde die Aufgabe erleichtern, ist aber für den ATmega328P zu aufwendig, da keine Fließkomma-Hardware integriert ist. Deshalb wird stattdessen die Festkomma-Arithmetik verwendet.

Eigene Firmware mit Microchip Studio

Um die Firmware des Waveform-Generators an Ihre eigenen Anforderungen anpassen zu können, laden Sie zunächst das *Microchip Studio for AVR and SAM Devices (IDE)* herunter [4] und installieren es auf Ihrem Windows-PC oder Mac. Das Tutorial [5] geht wahrscheinlich von einer „Zielplattform" aus mit einem Microchip- oder Atmel-Entwicklungsboard, die ein Hardware-Programmiertool wie Atmel AVRISP mk2 oder ähnlich verwendet. Es ist jedoch kein solches Tool erforderlich, um Firmware in die MCU des Arduino Nano zu laden, denn Sie können ein „Software-Programmierwerkzeug" im Microchip Studio erstellen (siehe „Option 2" weiter unten). Nachdem Sie das Firmware-Archiv von [2] heruntergeladen und extrahiert haben, kopieren Sie alle Dateien in einen neuen Ordner mit dem Namen *Nano-waveform-generator* auf einem lokalen Laufwerk, vorzugsweise in den vom Microchip Studio erstellten Projektordner in Ihren *Dokumenten*. Verbinden Sie nun den Arduino Nano mit einem USB-Anschluss Ihres PCs. Öffnen Sie dann das Microchip Studio und wählen Sie auf der Startseite *Open Project...* aus. Navigieren Sie zu dem von Ihnen erstellten Projektordner und klicken Sie auf den Dateinamen *Nano-waveform-generator.atsln*.

Suchen Sie auf der rechten Seite des IDE-Fensters den Tab *Solution Explorer* und klicken Sie darauf (**Bild 11**). Erweitern Sie die Liste *Libraries* und schauen Sie nach, ob die Bibliothek *lib_avrXmini.a* vorhanden ist. Diese Bibliotheksdatei enthält vorgefertigte Funktionen zur Unterstützung verschiedener Peripheriehardware, die üblicherweise in Anwendungen der ATmega328P-MCU verwendet werden.

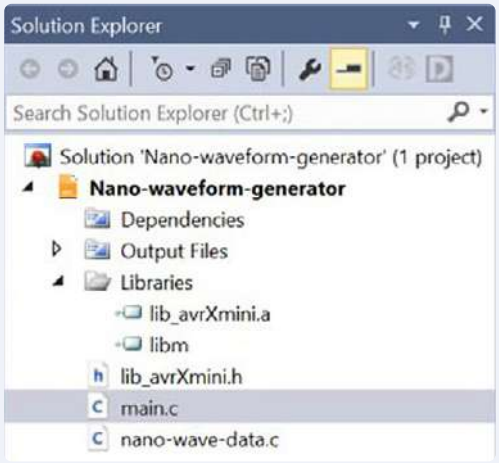


Bild 11. Screenshot des Solution Explorer Panels.

Um eine Quelldatei zu bearbeiten, die noch nicht im Editor geöffnet ist, klicken Sie auf den Dateinamen im *Solution Explorer Panel*. Um die Datei im Editor geöffnet zu lassen, klicken Sie auf das Pinsymbol im Dateireiter oben rechts im Editorfenster. Die Datei-Registerkarte wird dann auf die linke Seite des Fensters verschoben und bleibt geöffnet. Sie können sich die Header-Datei der Bibliothek *lib_avrXmini.h* ansehen, aber ändern Sie sie nicht, es sei denn, Sie beabsichtigen tatsächlich, Änderungen an der Bibliothek vorzunehmen. Im C-Quellcode können Sie jede Funktion der Bibliothek ändern oder weitere Funktionen hinzufügen.

Wenn Sie mit Ihren Änderungen fertig sind, erstellen (*build*) Sie Ihre Lösung, beheben alle Kompilierungsfehler und erstellen sie erneut. Befolgen Sie dann die unten stehenden Anweisungen, um die Firmware auf Ihren Arduino Nano zu übertragen. Es gibt zwei Möglichkeiten; in beiden Fällen wird davon ausgegangen, dass sich die *AVRDUDE*-Distributionsdateien in einem Ordner namens *Nano Wave Gen* auf dem lokalen Laufwerk Ihres PCs befinden.

Option 1:
Verwenden Sie die Windows-Eingabeaufforderung wie zuvor. Sie können die gleiche Methode wie unter *Installation der Firmware* beschrieben verwenden. Sie müssen lediglich die generierte Hex-Datei in den Ordner *Nano Wave Gen* kopieren. Jedes Mal, wenn Sie auf *Build Solution* klicken, ersetzt das Microchip Studio die Hex-Datei im Projektordner in einem Unterordner namens *Debug*. Wenn Ihr Projektordner *Nano-waveform-generator* heißt, finden Sie die Hex-Datei unter *Nano-waveform-generator\Debug*. Benennen Sie die erzeugte Hex-Datei vor der Programmierung so um, dass sie mit dem Dateinamen in der Windows-Befehlsdatei *Programm Nano.bat* identisch ist.

Option 2:
Erstellen Sie ein „Programming Tool" im Microchip Studio. Klicken Sie im Menü *Tools* → *External tools*. Sie sollten dann ein Dialogfeld sehen, in dem Sie nach einigen Parametern gefragt werden: Schreiben Sie in *Title*: *Program Nano* oder einen anderen Namen, den Sie bevorzugen. Schreiben Sie in *Command*: *C:\Nano Wave Gen\avrdude.exe*. Schreiben Sie in *Arguments* (alles in eine Zeile):

```
 -C "C:\Nano Wave Gen\avrdude.conf" -p atmega328p -c arduino -P COM4 -b 115200 -U flash:w:"$(ProjectDir)Debug\$(TargetName).hex":i
```

Ersetzen Sie COM4 durch den COM-Port, an den Ihr Nano-Board angeschlossen ist, und berücksichtigen Sie, dass einige Arduino Nano-Klone nur niedrigere Baudraten unterstützen. Aktivieren Sie das Kontrollkästchen *Use output window*. Klicken Sie auf *OK*. Fertig!
Sie sollten nun die neue Option *Program Nano* im Menü *Tools* sehen. Nachdem der Code erstellt wurde, programmieren Sie ihn in das Nano-Board, indem Sie einfach auf *Program Nano* im Menü *Tools* klicken.

Festkomma-Arithmetik verwendet die schnelle Ganzzahl-Arithmetik, aber mit zwei Integerzahlen (Langwörtern), die aus zwei Bit-Feldern bestehen, die den ganzzahligen und den gebrochenen Teil einer realen Zahl repräsentieren. Eine 16-Bit-Festkommazahl könnte so aus einem 8-Bit-Ganzzahlteil und einem 8-Bit-Nachkommateil bestehen. Bei vorzeichenlosen Zahlen wäre so der Bereich 0,0…255,99 (entspricht ungefähr der Dezimalzahl), bei vorzeichenbehafteten Zahlen der Bereich -127,99…+127,99 abgedeckt. Die Auflösung beträgt 1/256 ≈ 0,004, was für Anwendungen mit geringer Genauigkeit gut genug ist.
Eine 32-Bit-Festkommazahl setzt sich häufig aus einem 16-Bit-Ganzzahlteil und einem 16-Bit-Nachkommateil zusammen. Bei vorzeichenbehafteten Zahlen beträgt der Bereich dann ungefähr -32.000…+32.000. Die Auflösung (Genauigkeit) beträgt in diesem Fall etwa 1/65.000 ≈ 0,00001, was für unseren Funktionsgenerator mehr als ausreichend ist. Die Genauigkeit der Ausgangssignalfrequenz wird nur durch den MCU-Takt begrenzt.
In unserem Wavetable-Oszillator werden der Phasenwinkelschritt und der Phasenwinkel (Wellenabtastpunkt) durch 32-Bit-Festkommazahlen dargestellt. Der ganzzahlige Teil des Phasenwinkels wird als Array-Index verwendet, um einen Abtastpunkt aus der Tabelle abzurufen. Die Formel für die Beziehung zwischen Phasenwinkelschritt und Oszillatorfrequenz lautet

$$PhaseStep = OscFreq \times (TableSize / SampleRate)$$

wobei *PhaseStep* der Abstand zwischen den Sample-Punkten in der Wavetable, *OscFreq* die erforderliche Ausgangsfrequenz (in Hertz), *TableSize* die Gesamtzahl der Samples in der Wavetable und *SampleRate* die Abtastrate (32 kHz) ist.
Obwohl Wavetables prinzipiell jede beliebige Größe (im Rahmen der Programmspeichergröße) annehmen können, sollte die Tabellengröße mit der Auflösung des Ausgangssignals übereinstimmen. Als Faustregel gilt, dass die Tabellengröße etwa in der gleichen Größenordnung liegen sollte wie der maximale Wert der Samples in der Wavetable. Wenn die Ausgangssample-Werte beispielsweise 8-Bit-Zahlen ohne Vorzeichen sind, würde eine geeignete Wavetable 256 Samples umfassen. Eine größere Tabelle bietet prinzipiell denselben Vorteil wie eine Interpolation zwischen den Sample-Punkten, nämlich eine geringere Verzerrung der Wellenform.

Signal-Aliasing

Wenn Sie etwas über digitale Signalverarbeitung wissen, sind Sie vielleicht/bestimmt mit dem Begriff „Aliasing" vertraut und kennen seine Ursachen und Auswirkungen. Aliasing ist die Verzerrung einer abgetasteten Wellenform, die entsteht, wenn eine Frequenzkomponente in der analogen Eingangswellenform im Verhältnis zur Abtastrate zu hoch ist. Die Verzerrung äußert sich darin, dass unerwünschte Frequenzkomponenten in das abgetastete Signal eingebracht werden. Ein Beispiel: Wenn ein Signal eine Frequenzkomponente von 16 kHz enthält und dieses Signal mit nur 20 kS/s abgetastet wird, entstehen im (wiederhergestellten) Ausgangssignal neue und unerwünschte Komponenten bei den Summen- und Differenzfrequenzen, also bei 4 kHz und 36 kHz. Die 4-kHz-Komponente liegt sicher im hörbaren Bereich und wäre ein auffälliges Artefakt. Bei reinen Sinuswellen mit Frequenzen unterhalb der halben Abtastrate gibt es keinen Aliasing-Effekt. Wellenformen mit vielen Obertönen höherer Ordnung wie Rechteck-, Impuls- und Sägezahnwellen sind aber sehr anfällig für Aliasing. Ebenso tritt Aliasing bei Wavetable-Oszillatoren auf, wenn eine Wellenform, die durch Abtastpunkte aus einer Wavetable dargestellt wird, Frequenzkomponenten über der halben Abtastrate enthält, es sei denn, das Verhältnis von Ausgangsfrequenz zu Abtastfrequenz ist eine rationale Zahl. Durch eine sorgfältige Wahl der Wavetable-Größe im Verhältnis zur Abtastrate kann Aliasing bei bestimmten Ausgangsfrequenzen vermieden werden. In diesem Wellenformgenerator enthält die Tabelle 640 Samples, und es wurden feste Ausgangsfrequenzen gewählt, um Aliasing-Effekte zu vermeiden.

Schließlich…

Wie bereits erwähnt, handelt es sich hier nicht um ein komplettes DIY-Projekt, sondern eher um eine technische Demonstration dessen, was mit einem billigen Arduino Nano möglich ist. Es steht Ihnen frei, den Code und die Schaltung an Ihre eigenen Bedürfnisse anzupassen oder als Inspirationsquelle für Ihre eigenen Projekte zu verwenden.

RG – 220641-02

Über den Autor

Michael Bauer ist ein erfahrener Ingenieur, der sich für elektronische Musiktechnik interessiert (zum Beispiel ausgefallene Blasinstrumente und DSP-Klangsynthese). Er lebt in Victoria, Australien.

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Senden Sie eine E-Mail an Elektor unter redaktion@elektor.de oder kontaktieren Sie den Autor unter mjbauer@iprimus.com.au.

Passende Produkte

- **1-Kanal Oszilloskop (20 MHz) + Multimeter HDS1021M-N von OWON**
  https://elektor.de/18778
- **Robert Sontheimer, Arduino & Co – Messen, Schalten und Tüfteln (überarbeitete Auflage)**
  Buch, kartoniert: https://elektor.de/19975
  E-Buch, PDF: https://elektor.de/19976

WEBLINKS

[1] AVRDUDE auf Github: https://github.com/avrdudes/avrdude
[2] Projekt-Downloads bei Elektor Labs: https://elektormagazine.de/labs/nano-waveform-generator
[3] Datenblatt ATmega328P: https://tinyurl.com/4w2uzpy2
[4] Microchip Studio: https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/develop/microchip-studio
[5] Getting Started with Microchip Studio: https://tinyurl.com/39bsmzbd

Von der Idee zum realen Produkt

Sie sind innovativ und träumen von einer besseren Zukunft. Die technischen Services von Arrow helfen Ihnen dabei, Ihre Vorstellungen in die Praxis umzusetzen.

Erfahren Sie mehr: **arrow.com/fiveyearsout**



Five Years Out

Solarbetriebene Weihnachts-girlande

Eine umweltfreundliche Lösung für die Dekoration Ihres Balkons



Von Laurent Labbe (Frankreich)

Wenn Sie eine der vielen Varianten von batteriebetriebenen LED-Girlanden besitzen und etwas Clevereres und Umweltfreundlicheres wollen, finden Sie in diesem Artikel, was Sie brauchen. Es handelt sich um eine „intelligente“ mikrocontrollerbasierte Schaltung, die ihren eigenen Li-Po-Akku mit einer Photovoltaikzelle aufladen kann und bei Einbruch der Dunkelheit automatisch in Betrieb geht - mit vielen attraktiven Lichteffekten für Ihren Balkon!

In den letzten Jahren haben wir unseren Balkon jedes Jahr zu Weihnachten mit einer einfachen Girlande aus China geschmückt, die wir für ein Taschengeld gekauft hatten. Sie wird mit zwei einfachen AA-Batterien betrieben und besteht aus 20 LEDs. Jedes Jahr habe ich darüber nachgedacht, diese Girlande aufzupeppen, um sie lustiger zu machen und ohne die beiden Alkalibatterien zu betreiben. Dank meines Sohnes Louis, der sich um den mechanischen Teil kümmerte, konnte ich dieses Modding-Projekt schließlich abschließen.

Ich habe mir vorgestellt, die beiden Batterien durch ein Dummy-Gehäuse mit zwei Dummy-Zylindern zu ersetzen, von denen einer eine Lithiumzelle und der andere die Elektronik enthält, wie in **Bild 1** zu sehen. Damit ich die Zelle nicht dauernd und extern aufladen müsste, plante ich außerdem den Einbau eines kleinen Solarpanels (**Bild 2**), das nicht nur die Batterie auflädt, sondern auch erkennt, ob es Tag oder Nacht ist und das Gerät automatisch tagsüber in den Ladezustand und nachts in den „Blink-Zustand“ schaltet.

Hardware

Für die Blinkfunktion habe ich, wie Sie im Schaltplan (**Bild 3**) sehen können, einen 8-Pin-Mikrocontroller 12LF1572 von Microchip gewählt, der einen NPN-Transistor des Typs 2N2222 ansteuert. Dieser Schalter schließt die Kathoden der LEDs mit Masse kurz, um die Blinkeffekte zu realisieren. Über einen Taster kann der Benutzer das gewünschte Blinkmuster auswählen, einschließlich einer Option für zufälliges Blinken.

Der Ausgang des Solarmoduls (5 V, Größe 65×35 mm) ist mit einem Widerstandteiler aus dem Festwiderstand R3 und einem einstellbaren Widerstand R1 verbunden, dessen Schleifer auf den AN-Eingang des A/D-Wandlers des Mikrocontrollers gelegt ist. Zum Laden der Batterie wurde eine einfache, aber keinesfalls „orthodoxe“ Lösung gewählt: eine Schottky-Diode, die direkt an die Zelle angeschlossen ist. Normalerweise wäre in solchen Fällen ein 4,2-V-Spannungsregler-IC erforderlich, um ein Überschreiten der maximalen Ladespannung des LiPo-Akkus zu vermeiden, aber aufgrund des geringen Stroms, der von der Solarzelle erzeugt wird, ist das Risiko einer Beschädigung der Schaltung und des Akkus sehr gering (zumal im Winter), und der Gesamtwirkungsgrad ist hoch genug für den Umfang dieses Projekts.

Um Tag von Nacht zu unterscheiden, wird die Ausgangsspannung des Solarpanels über einen AN-Eingangskanal des Mikrocontrollers an Pin 6 überwacht. Der Widerstand in Reihe mit dem Trimmpoti schützt den µC vor Spannungen über 4,2 V, die von der Solarzelle kommen könnten. Die Diode ist direkt an die Batterie angeschlossen und befindet sich vor dem Schalter. Damit soll verhindert werden, dass bei starker Sonneneinstrahlung und ausgeschaltetem Netzschalter eine hohe Spannung von der Solarzelle zum µC gelangt. In diesem Fall könnte

die Solarzelle nämlich mehr als die 5 V liefern, die die absolute Höchstspannung des Mikrocontrollers darstellen. Der Controller wird mit dem PICkit 3-Debugger von Microchip über den entsprechenden Anschluss programmiert.

Software

Die Software wurde in C unter MikroC Pro geschrieben und ist unter [1] verfügbar. Nach der Initialisierung der Variablen, Parameter und Register beginnt eine Setup-Schleife. Wenn in dieser Schleife der Taster beim Einschalten gehalten wird, kann der Benutzer die Anzahl der Stunden ändern, die die Girlande nachts in Betrieb sein soll. Ein Blinken steht für eine Stunde, zwei Blinken für zwei Stunden und so weiter, bis zu einem Maximum von zwölf Stunden. Der voreingestellte Wert ist sechs Stunden. Wenn die Taste losgelassen wird, wird der Timer auf diesen Wert eingestellt. Der Wert wird allerdings nicht gespeichert und muss bei jedem Einschalten des Geräts neu eingestellt werden. Dieser Makel der Softwarefunktionalität sollte in der Tat noch verbessert werden.
Nach dieser Phase beginnt die Endlosschleife. Sie prüft zunächst den Status der Drucktaste. Bei jeder Betätigung wird zwischen den verschiedenen LED-Blinkmustern gewechselt, als da wären:

Zufälliges Muster zwischen 300 ms (aus) und 1500 ms (an), das sich bei jedem Zyklus mit der Funktion `srand()` ändert.

- 200 ms an, 1000 ms aus
- 800 ms ein, 1000 ms aus
- 500 ms ein, 500 ms aus
- 300 ms ein, 300 ms aus, 300 ms ein, 1000 ms aus

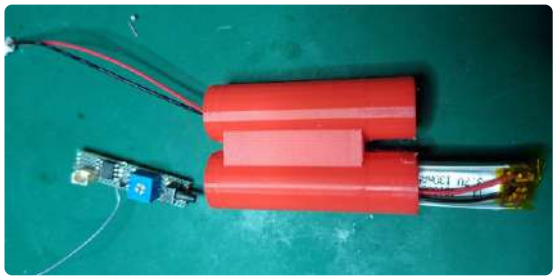


Bild 1. Das 3D-gedruckte Gehäuse für die Elektronik und die LiPo-Zelle.

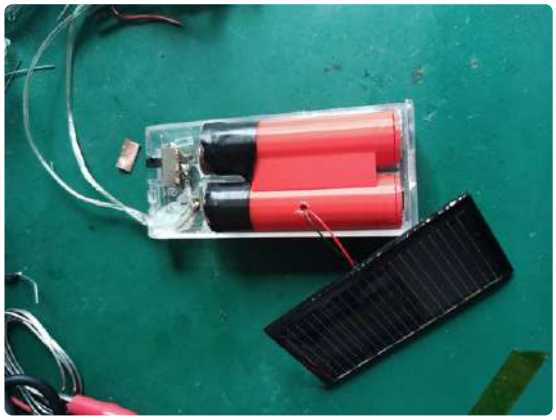


Bild 2. Das kleine Solarpanel zum Aufladen der LiPo-Zelle bei Tag.

Am Ende eines jeden Musters gibt es einen Wartezyklus von 2.000 ms. Die Schleife aktiviert das Muster nur, wenn die Spannung am Solarpanel 0 V beträgt. Wenn Tageslicht vorhanden ist, wird kein Muster aktiviert und die Schleife macht nicht mehr, als jeden Durchlauf 2 s zu warten.
Für alle langen Verzögerungen wird die Funktion `tempo()` eingesetzt. Diese Funktion verwendet die Funktion `sleep()` und die Watchdog-Funktion, die auf 2000 ms eingestellt ist. Dies ist die beste Lösung bezüglich der Energieeffizienz.

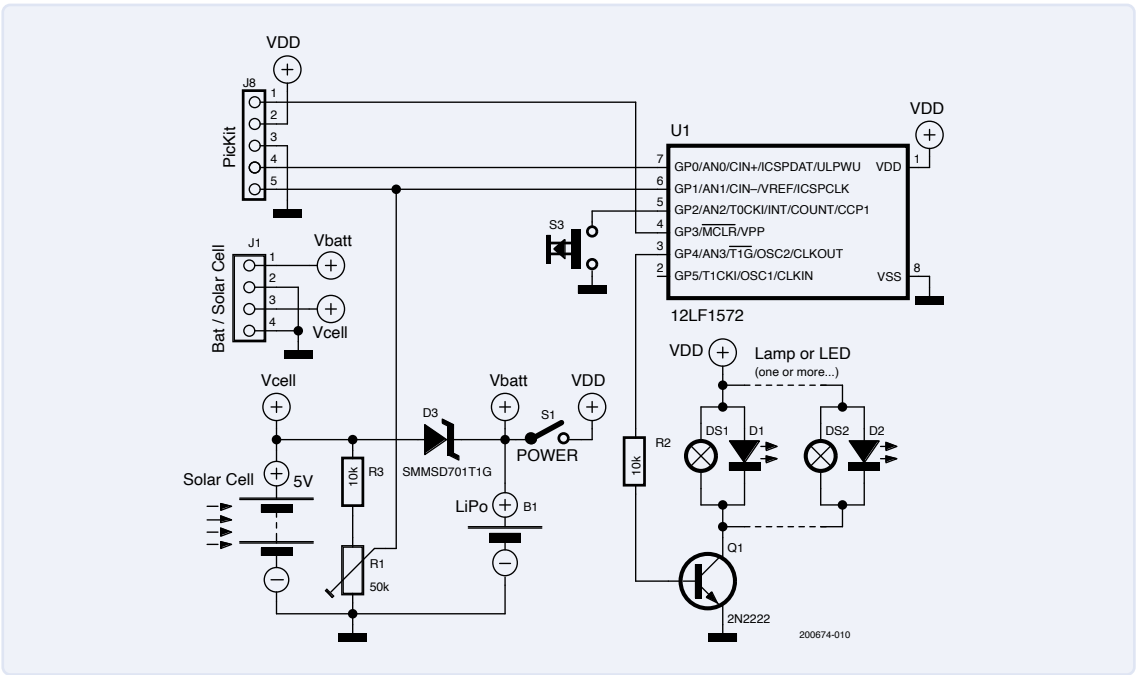


Bild 3. Der einfache Schaltplan für dieses Projekt.

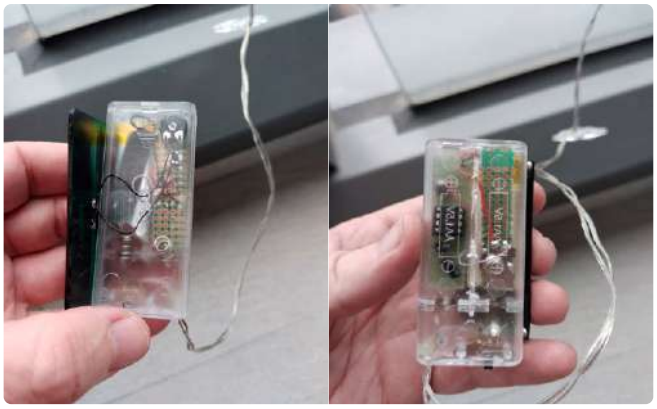


Bild 4. Der erste Funktionsprototyp in der Vorder- (links) und Rückansicht (rechts).

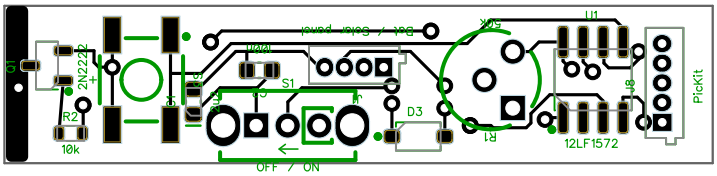


Bild 5. Das einseitige Platinenlayout in der Größe einer Mignonzelle.

Umsetzung

Nach der Realisierung des ersten funktionierenden Prototyps, dessen Vorder- und Rückseite in **Bild 4** dargestellt sind, erstellte mein Sohn mit Tinkercad [2] das Dummy-Gehäuse für die beiden AA-Batterien, das bereits in Bild 1 zu sehen war. An der Seite des positiven Anschlusses platzieren wir die Lithium-Polymer-Batterie in beliebiger Größe und Kapazität, Hauptsache, sie passt in das Gehäuse. Das Pluskabel der Batterie wird mit dem Pluskabel des ursprünglichen Girlandenkontakts und mit einem weiteren Kabel mit der Leiterplatte verbunden, deren Layout in **Bild 5** zu sehen ist.

Der Minuspol der Batterie ist direkt mit der Platine verbunden. Der Kollektor des 2N2222 (Sie können auch einen anderen NPN-Schalttransistor verwenden) wird mit dem Minuspol der ursprünglichen Girlande verbunden. Die Platine kann in den zweiten Hohlraum des Dummy-Gehäuses eingebaut werden, wobei die Kabel zur Batterie und zum Solarpanel (zweiter Anschluss) geführt werden.

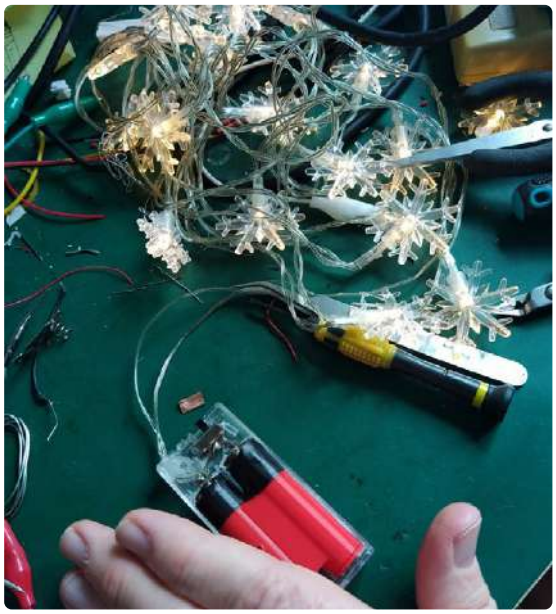


Bild 6. Die fertige „smarte“ Girlande.

Für den Anschluss an den Kontakt der ursprünglichen Girlande habe ich eine Kupferfolie verwendet, die auf die Batterieattrappe geklebt wurde. Das Endergebnis meiner harten Arbeit ist in **Bild 6** zu sehen, wobei die LED-Girlande mein Projekt schön beleuchtet.

RG – 200674-02

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Schreiben Sie bitte an das Elektor-Team unter redaktion@elektor.de.



Über den Autor

Laurent ist 60 Jahre alt, lebt seit mehr als 20 Jahren in Asien und begeistert sich für Elektronik, seit er zehn Jahre alt ist. Er hat viele Zeitschriften gelesen, darunter Elektor seit dem Jahr 1978. Laurent begann in den 1980er Jahren mit Mikrocontrollern zu spielen, der 8051-Familie und in jüngerer Zeit mit der PIC-Familie und dem ESP32, wann immer eine Netzwerkverbindung benötigt wird. Er hat viele Halbleiter- (Elektor) als auch Röhrenverstärker (300B SE) Verstärker gebaut und viele Lautsprechersysteme und DACs. Er arbeitet seit mehr als 30 Jahren in der Mobiltelefonbranche (Hardware, Software, Betrieb, Qualität) für ein französisches Unternehmen.

WEBLINKS

[1] Platinenlayout und Softwarepaket für dieses Projekt: https://elektormagazine.de/labs/solar-power-christmas-garland
[2] Autodesk-Tinkercad-Website: https://tinkercad.com

Passende Produkte

- **Bert van Dam, PIC-Mikrocontroller**
  E-Buch, PDF, deutsch:
  www.elektor.de/17423
- **Solarmodul für den Außenbereich von Seeed Studio**
  www.elektor.de/19131
- **Diamex LED-Player M**
  www.elektor.de/19911

Treten Sie jetzt der Elektor Community bei!



Jetzt elektor GOLD membership Mitglied werden!



- Komplettes Webarchiv ab 1970
- 8x Elektor Doppelheft (Print)
- 8x Digital (PDF)
- 10% Rabatt im Online-Shop und exklusive Angebote
- Zugriff auf über 5.000 Gerber Dateien aus Elektor Labs



Auch erhältlich

Die digitale elektor GREEN membership Mitgliedschaft!

- Zugang zu unserem Webarchiv
- 10% Rabatt in unserem Online-Shop
- 8x Elektor Doppelheft (PDF)
- Zugriff auf über 5.000 Gerber Dateien aus Elektor Labs

www.elektormagazine.de/Abonnement

elektor design › share › earn

USB-Killer-Detektor

Besser sicher als traurig

Von Carlos Guzman (USA)

USB-Killer sind bösartige Geräte, die als USB-Flash-Laufwerke getarnt sind. Wenn ein solcher Stick an den USB-Anschluss eines Computers, Tablets oder Telefons angeschlossen wird, versucht er, den USB-Anschluss und mehr zu zerstören. Mit dem hier beschriebenen Detektor können Sie solche USB-Sticks identifizieren, bevor sie Schaden anrichten.

USBKill [1] ist ein USB-Flash-Laufwerk zum Testen von USB-Anschlüssen, das die 5 V eines USB-Anschlusses in etwa -200 V umwandelt, was zur Zerstörung des angeschlossenen ungeschützten PCs, Laptops oder sogar eines Telefons führen kann. Da USBKill mit einer deutlichen Beschriftung auf der Außenseite versehen ist, die darauf hinweist, dass es sich um ein professionelles Pen-Testing-Gerät handelt, das mit Vorsicht zu behandeln ist, stellt es keine wirkliche Gefahr dar.

Gefährlicher sind jedoch die so genannten „USB-Killer"-Sticks, die von normalen Flash-Laufwerken nicht zu unterscheiden sind. Sie sehen aus wie gewöhnliche Flash-Laufwerke, können aber schwere Schäden an den Geräten verursachen, an die sie angeschlossen sind.

Meine persönliche Erfahrung

Mein Vater kauft viele Dinge online ein. Er kauft Elektronikbauteile, da er Elektroniker ist, aber er bringt auch unnötige Produkte wie ein Übermaß an Muttern, Schrauben und Werkzeugen mit nach Hause. Er hat zu Hause ein Zimmer, das so vollgestopft ist, dass ich darin kaum treten kann.

Vor einiger Zeit fand ich einen alten Film auf meinem Computer, den ich auf dem Fernseher ansehen wollte, und suchte nach einem USB-Stick. Da ich keinen zur Hand hatte, ging ich in den Elektronikraum meines Vaters und fand einen. Ich schloss ihn an meinen Computer an, ging um den Tisch herum und stellte fest, dass sich der Computer ausgeschaltet hatte. Nur das schwache Geräusch, das kurz nach dem Anschließen des Flash-Laufwerks aufgetreten war, blieb.

Nachdem ich festgestellt hatte, dass sich mein Computer nicht mehr einschalten ließ, überprüfte ich alle Kabel und die Netzversorgung.



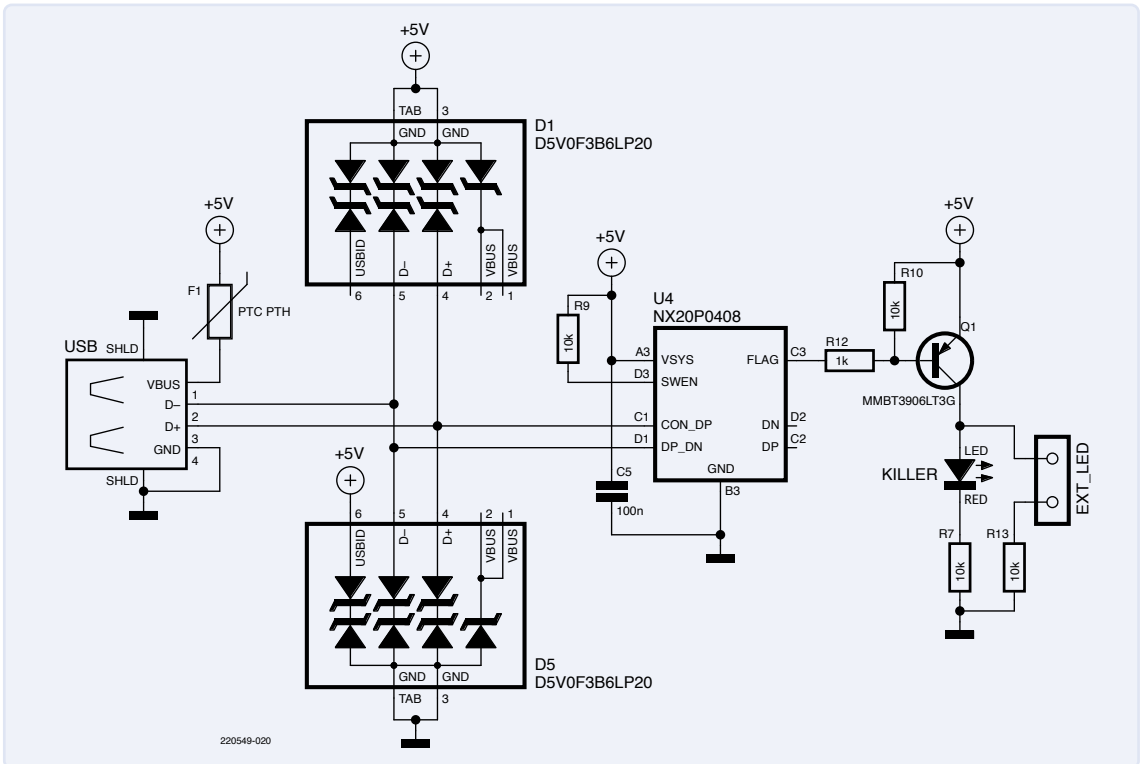


Bild 1. Der Schaltplan des USB-Killer-Detektors ohne Stromversorgung. Die rote LED signalisiert Gefahr.

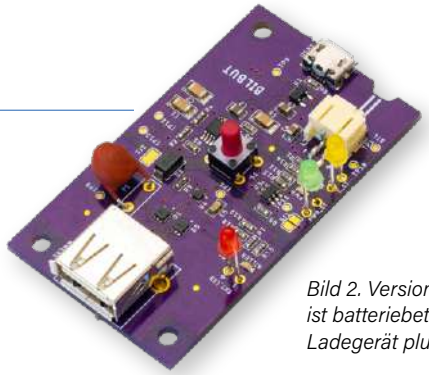


Bild 2. Version 1 des USB-Killer-Detektors ist batteriebetrieben und enthält ein LiPo-Ladegerät plus Boost-Konverter.

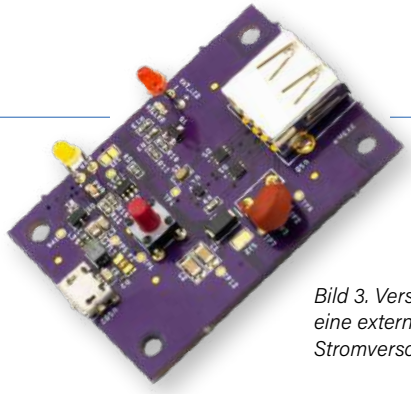


Bild 3. Version 2 benötigt eine externe 5-VDC-Stromversorgung.

Alles funktionierte wie gewohnt, nur mein Computer ließ sich nicht mehr einschalten. Nach einigen Tagen der Untersuchung stellte sich heraus, dass die Ursache das USB-Flash-Laufwerk aus dem Zimmer meines Vaters war. Auf der Außenseite gab es keine Hinweise darauf, um was es sich handelte. Er sah aus wie jeder andere USB-Speicherstick, war aber in Wahrheit ein USB-Killer.

Warum das und was man dagegen tun kann

Wie ich fragen Sie sich vielleicht auch, warum es USB-Killer gibt. Die Antwort scheint vor allem „einfach so" zu lauten. Deshalb haben mein Vater und ich beschlossen, ein Gerät zu entwickeln, das USB-Killer erkennen kann, bevor sie einen Computer beschädigen.

Ein USB-Killer nutzt die 5 V des USB-Anschlusses, um Bursts von etwa -200-V-Impulsen auf die USB-Datenleitungen zu legen. Das ist eine sehr effektive Technik, um USB-Ports und mehr am Computer zu zerstören. Der USB-Killer-Detektor in **Bild 1** verwendet ein spezielles IC für den Schutz von USB-Datenleitungen, den NX20P0408 von NXP [2], der einen Fehler anzeigt, wenn an diesen Pins etwas nicht in Ordnung ist. Zusätzliche Supressordioden (D1 und D5) sorgen dafür, dass der Detektor selbst nicht zerstört wird. Ein PTC bietet für noch mehr Schutz, indem er den Killer-Stick ausschaltet, wenn er einfach zu gefährlich für die Handhabung ist.

Das Flag-Signal des ICs steuert eine rote LED an. Wenn die LED aufleuchtet, sollten Sie das Flash-Laufwerk, das Sie gerade eingesteckt haben, zerstören.

Zwei Versionen

Wir haben zwei Versionen des USB-Killer-Detektors entwickelt:

1. Eine tragbare, batteriebetriebene Version, die Sie überallhin mitnehmen können (**Bild 2**). Sie enthält ein LiPo samt Akkuladegerät und einen Boost-Konverter, der die Batteriespannung in 5 V für den USB-Stick umwandelt.
2. Da wir den USB-Killer-Detektor online verkaufen wollten, haben wir eine Version mit externer Stromversorgung entwickelt, da es schwierig ist, LiPo-Batterien und Geräte mit solchen Batterien zu versenden. Man benötigt ein Micro-USB-Kabel, das 5 V liefert (**Bild 3**). Verwenden Sie auch bitte ein Handy-Ladegerät für die Stromversorgung, nicht Ihren Computer.

Die Entwurfsdateien für beide Versionen des Geräts finden Sie auf GitHub [3].

Ein letztes Wort

Glauben Sie, dass USB-Killer-Sticks eine urbane Legende sind? Im Jahr 2019 wurde in den USA ein Mann zu zwölf Monaten Gefängnis und einer Geldstrafe von 58.471 Dollar verurteilt, nachdem er in einer Schule in Albany 66 Computer mit einem USB-Killer absichtlich zerstört hatte [4].

Das Video unter dem Link [5] wurde in den letzten fünf Jahren mehr als 20 Millionen Mal aufgerufen, das bedeutet zehntausend Aufrufe pro Tag, jeden Tag. Ein ähnliches Video [6] wurde in den letzten zwei Jahren fast zwei Millionen Mal angesehen. Und haben Sie schon einmal bei Online-Händlern nach USB-Killer-Sticks gesucht? Tun Sie das einmal, spaßeshalber! Wenn Sie das getan haben, werden Sie feststellen, dass sie leicht zu kaufen sind. USB-Killer-Sticks gibt es wirklich, und ich habe Sie gewarnt.

Wenn Sie mir bei der Bekämpfung von USB-Killern helfen möchten, schließen Sie sich mir auf [7] an. Ich danke meinem Vater, Alberto Guzman, für die Zeit, die wir gemeinsam mit der Entwicklung des Geräts verbracht haben.

RG – 220549-02

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Schicken Sie eine E-Mail an den Autor unter instant.devices@yahoo.com oder kontaktieren Sie Elektor unter redaktion@elektor.de.

Passende Produkte

- **Elektor Archiv 1970-2022**
  USB-Stick, deutsch: www.elektor.de/20373
- **The Elektor Power Supply Collection**
  USB-Stick, mehrsprachig: www.elektor.com/20451

WEBLINKS

[1] USBKill: https://usbkill.com
[2] Datenblatt NX20P0408: https://t1p.de/5rsxz
[3] Vollständige Projektdetails auf GitHub: https://github.com/instantdevices/USB-Killer-Detector
[4] Gerichtsverfahren in den USA: https://t1p.de/fwynh
[5] Beispielvideo 1: https://youtu.be/Y1o1nwlpY4I
[6] Beispielvideo 2: https://youtu.be/FLkXiP1fC2A
[7] Helfen Sie mir, USB-Killer zu bekämpfen: https://opencollective.com/usb-killer-detector
[8] Dieses Projekt bei Elektor Labs: https://elektormagazine.de/labs/usb-killer-detector-v1

Ein einfaches CNC-Gehäuse

Schritt für Schritt mit Autodesk Fusion 360

Von Vaclav Krejci (Tschechien)

Benutzerdefinierte Gehäuse für Ihre Heimwerkerprojekte müssen nicht unbedingt 3D-gedruckt werden - sie können auch aus einem Metall wie Aluminium gefräst werden, mit einem hochprofessionellen Ergebnis. Selbst wenn Sie keine eigene CNC-Maschine haben, sind die Herstellungskosten erschwinglich, die Software-Tools sogar kostenlos und die Schritte einfach.



In diesem Tutorial lernen Sie, wie Sie ein kundenspezifisches Gehäuse für das Drehgebermodul von DFRobot erstellen. Mit Arbeiten, die vielen Gehäusen gemeinsam sind, sollte dies eine gute Demonstration sein, wie Sie ein benutzerdefiniertes Gehäuse für Ihr eigenes Projekt erstellen können.

Um das Softwaremodell des Gehäuses zu entwerfen, verwenden wir das Programm *Autodesk Fusion 360 for Personal Use*. Diese Software ist (wenn Sie wollen, deutschsprachig), kostenlos und für Bastler, Maker und nichtkommerzielle Arbeiten gedacht. Es gibt zwar einige Einschränkungen im Vergleich zu den kostenpflichtigen Vollversionen, aber keine davon sollte unsere Arbeit beeinträchtigen. Fusion 360 läuft nur unter Windows 10 und Windows 11. Achten Sie auch darauf, dass Sie nach der Erstellung Ihres Accounts die richtige Version von Fusion 360 herunterladen, es ist einigermaßen verwirrend!

Verwendete Software:

- Autodesk Fusion 360 for Personal Use [1]

Verwendete Komponenten:

- Drehgebermodul von DF Robot [2]
- Arduino UNO (aber jedes Arduino-Board kann verwendet werden)

Schritt für Schritt

1) Der erste Schritt bei der Erstellung eines 3D-Modells besteht in einer 2D-Zeichnung, der so genannten Skizze (**Bild 1**). Klicken Sie in Fusion 360 in der Symbolleiste auf den Button *Create Sketch* und wählen Sie eine Ebene aus, auf der Sie die Skizze platzieren möchten. Da unser Gehäuse nach oben extrudiert wird, ist es sinnvoll, die Skizze zunächst auf der unteren Ebene des 3D-Raums zu platzieren.

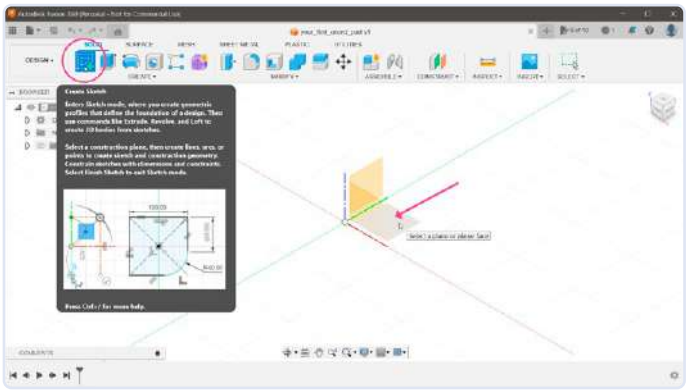


Bild 1. Erste Schritte zum Platzieren Ihrer Skizze. (Quelle aller Bildschirmfotos: Autodesk)

2) Die Größe des Drehgebermoduls von 37 mm × 37 mm habe ich mit dem Messschieber aka Schieblehre ermittelt. Wir erstellen ein neues Rechteck, das die Größe der Platine visualisiert (**Bild 2**). Gehen Sie zu *CREATE* | *Rectangle* | *Center Rectangle*. Sobald das Werkzeug aktiv ist, setzen Sie den ersten Punkt auf den Ursprung. Geben Sie über die Tastatur eine Abmessung (37) ein, springen Sie mit

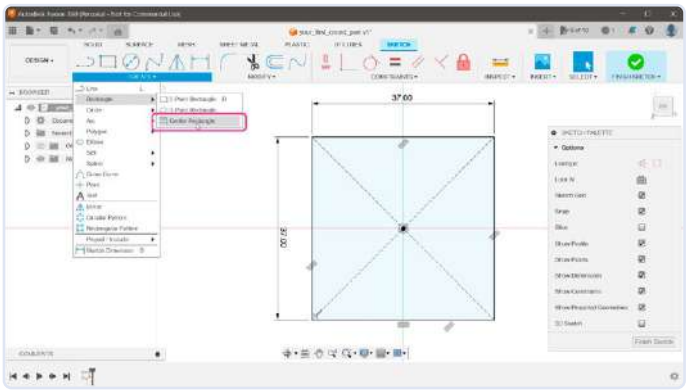


Bild 2. Festlegen der Rechteckgrößen.

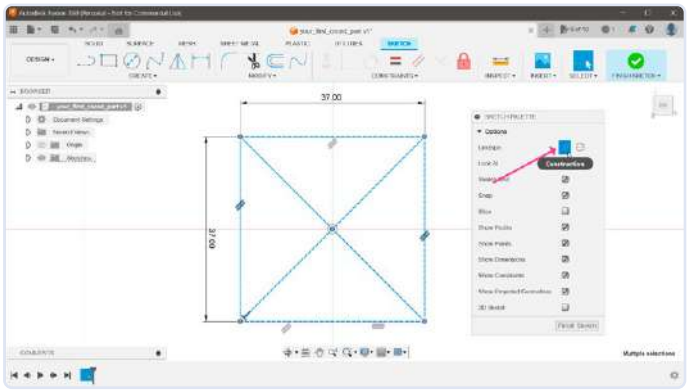


Bild 3. Ändern der Liniendefinition im Konstruktionsmodus.

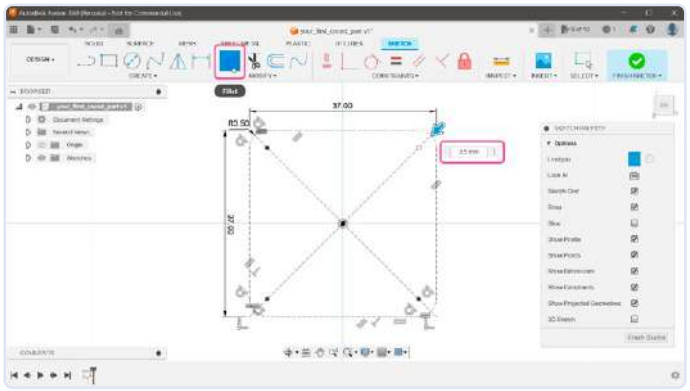


Bild 4. Abrunden der Gehäuseecken.

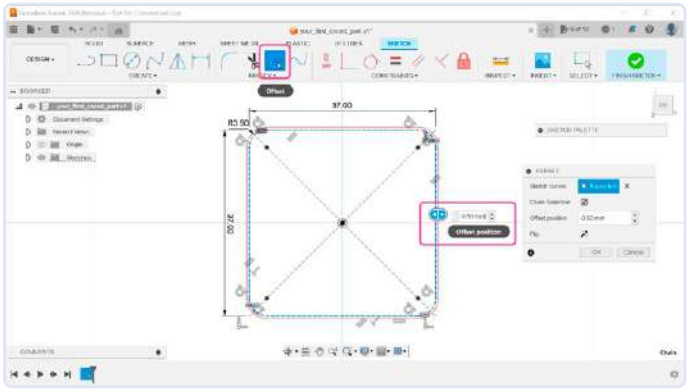


Bild 5. Versatz des Gehäuses, um die Geberplatine besser einpassen zu können.

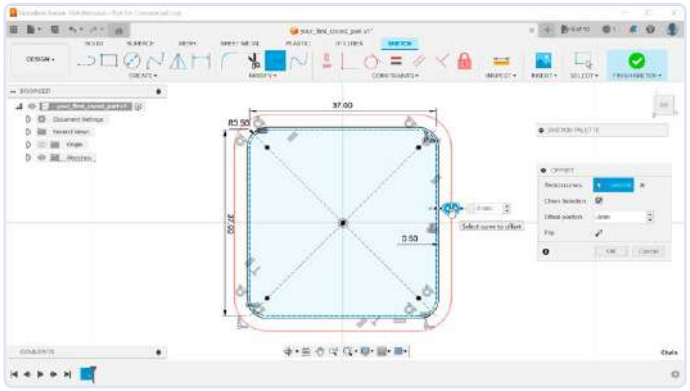


Bild 6. Einstellen der Wandstärken.

der Tabulatortaste zum nächsten Bearbeitungsfeld und geben Sie den zweiten Wert (37) ein. Drücken Sie die Eingabetaste, um den Erstellungsprozess abzuschließen.

3) Wir können diese Form nicht zum Extrudieren des Gehäuses verwenden, da wir Platz um die Platine herum benötigen. Daher wählen wir alle Linien aus und wandeln sie in Konstruktionslinien um, indem wir im Dialogfeld *Sketch Palette* auf den Button *Construction* klicken. Dadurch wird Fusion 360 mitgeteilt, dass diese Linien nur als Hilfslinien verwendet werden (**Bild 3**).

4) Die Platine hat abgerundete Ecken, und es wäre schön, wenn unser Gehäuse an diese angepasst wäre (**Bild 4**). Eine grobe Messung zeigt, dass der Eckenradius etwa 3,5 mm beträgt. Wählen Sie in der Werkzeugleiste das Verrundungswerkzeug *Fillet Tool* und klicken Sie auf alle äußeren Linien einzeln. Geben Sie als *Fillet Radius* 3,5 mm ein.

5) Wir müssen das abgerundete Rechteck etwas versetzen, damit die Leiterplatte frei hineinpasst (**Bild 5**). Wählen Sie in der Werkzeugleiste das Werkzeug *Offset* und geben Sie einen Wert von -0,5 mm ein.

6) Ein weiterer Versatz ist für die Wandstärke unseres Gehäuses erforderlich (**Bild 6**). Wiederholen Sie den letzten Schritt, aber geben Sie den Versatz von -3 mm ein. Dadurch werden später 2,5 mm dicke Wände erzeugt.

7) Wir haben nun genügend Formen, um sie zu extrudieren. Schließen Sie die Skizzenbearbeitung ab, indem Sie auf den Button *Finish Sketch* klicken, und wählen Sie dann das Extrudieren-Werkzeug *Extrude* aus der Werkzeugleiste aus (**Bild 7**). Klicken Sie auf das innere abgerundete Rechteck in der Skizze und geben Sie einen Abstand von 2 mm ein.

8) Wir wollten die Wände extrudieren, aber sie sind plötzlich verschwunden. Keine Sorge, es ist nur die Skizze, die ausgeblendet ist. Öffnen Sie im Browser in der oberen linken Ecke (**Bild 8**) die Gruppe *Sketches* und machen Sie *Sketch1* sichtbar. Nun können Sie das Werkzeug *Extrude* aus der Werkzeugleiste auswählen und auf das außen gerundete Rechteck klicken. Geben Sie den Abstand von 15 mm ein, die spätere Höhe unseres Gehäuses.

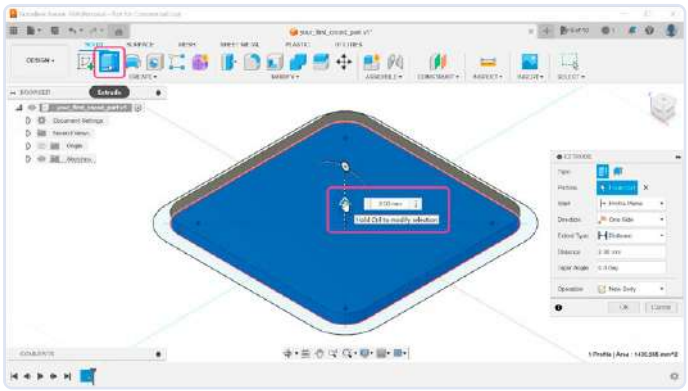


Bild 7. Start der Extrusion.

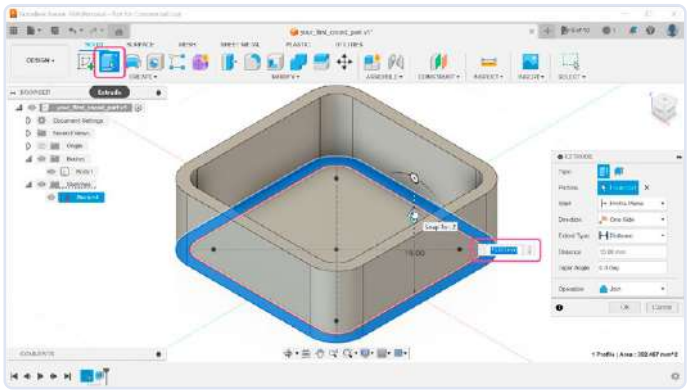


Bild 8. Einstellung der Gehäusehöhe.

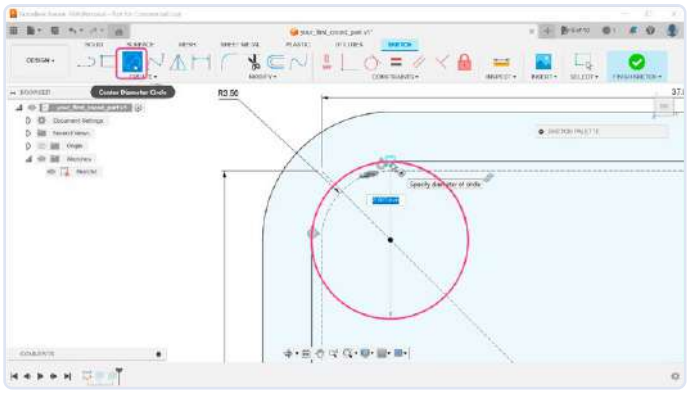


Bild 9. Positionierung der Mitte eines Schraubdoms.

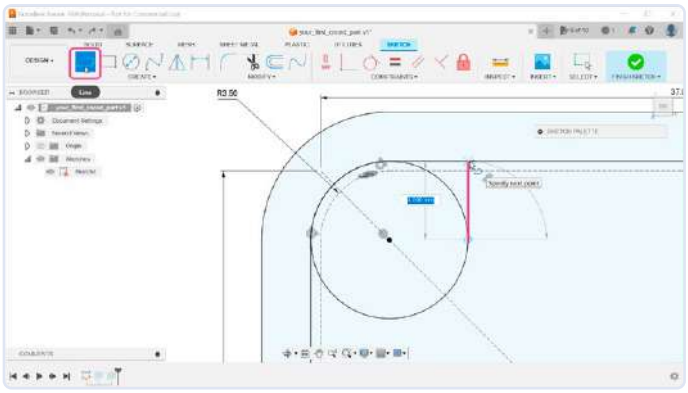


Bild 10. Formgebung des Schaubdoms mit dem Linienwerkzeug.

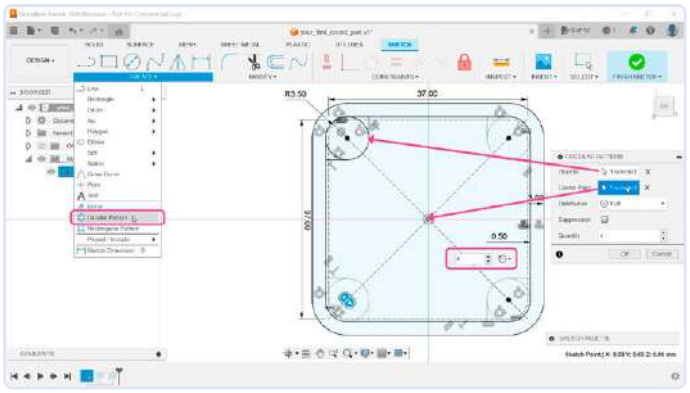


Bild 11. Kopieren des Schaubdoms für die anderen drei Ecken.

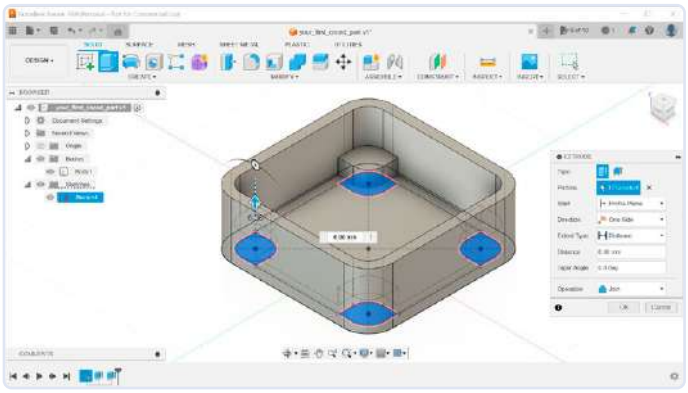


Bild 12. Extrudieren der vier Schaubdome.

9) Das Drehgebermodul soll auf irgendwelchen Stützen stehen, und es wäre schön, wenn diese Stützen Löcher für Schrauben hätten (Schraubdome). Für diese Stützen benötigen wir einen weiteren *Sketch*, aber anstatt einen neuen zu erstellen, können wir auch die vorhandene Skizze verwenden. Um in den Bearbeitungsmodus zurückzukehren, doppelklicken Sie im Browserfenster auf das Element *Sketch*. Die Löcher in der Platine haben einen Durchmesser von 3 mm und die Stützen müssen entsprechend größer gemacht werden. Um die spätere Herstellung des Gehäuses zu erleichtern, sollten wir sie so groß machen, dass sie die Wände des Gehäuses berühren. Wählen Sie das Werkzeug *Center Diameter Circle* aus der Werkzeugleiste und zeichnen Sie einen Kreis in der oberen linken Ecke, der so groß ist (8 mm Durchmesser), dass er die Innenseite der Gehäusewand berührt (**Bild 9**).

10) Der Bereich zwischen Kreis und Wand ist sehr schmal (**Bild 10**) und schwierig bis unmöglich herzustellen. Wir können ihn schließen, indem wir weitere Formen mit einem Linienwerkzeug zeichnen. Wählen Sie in der Werkzeugleiste das Werkzeug *Line* und bewegen Sie den Mauszeiger über den Mittelpunkt des Kreises. Danach bewegen Sie den Mauszeiger weiter nach rechts, bis Sie den Kreis erreichen. Zeichnen Sie an dieser Stelle den ersten Punkt der Linie. Bewegen Sie den Mauszeiger nach oben, bis Sie die Wand erreicht haben. Zeichnen Sie an dieser Stelle einen zweiten Punkt auf der Linie. Versuchen Sie dabei, die Maus möglichst geradlinig zu führen. Fusion 360 erkennt ihr Bemühen an und sorgt automatisch für die notwendige Geradlinigkeit.

11) Es werden drei weitere Schraubdome benötigt, aber anstatt diese manuell zu zeichnen, können wir mit einigen Werkzeugen die aktuelle Stütze duplizieren. Eine offensichtliche Wahl wäre das Spiegel-Werkzeug (*CREATE* | *Mirror*). Als Ein-Klick-Lösung bietet sich in diesem Fall das Werkzeug *Circular Pattern* an, das sich ebenfalls im Menü *CREATE* befindet. Wenn das Werkzeug aktiv ist, müssen wir nur den Kreis und die beiden Linien auswählen (**Bild 11**). Nun klicken Sie auf die Schaltfläche *Select* neben dem Mittelpunkt, wählen Sie den Ursprungspunkt aus und geben Sie für *Quantity* den Wert 4 ein.

12) An diesem Punkt können wir die Bearbeitung der Skizze abschließen, indem wir auf die Schaltfläche *Finish Sketch* klicken, und können die Stützen extrudieren. Wenn der Körper sichtbar ist, könnte es schwierig sein, die gewünschten Flächen in der Skizze auszuwählen. Eine einfachere Methode besteht darin, *Body1* vorübergehend im Browser auszublenden, das Werkzeug *Extrude* auszuwählen (**Bild 12**) und die Formen in der Skizze auszuwählen. Wie auch immer, bevor Sie extrudieren, müssen Sie *Body1* für die Stützen anzeigen, die mit diesem Körper verbunden werden sollen. Der Abstand sollte 6 mm betragen, und sorgen Sie im *Extrude*-Dialog dafür, dass *Operation* auf Verbinden (*Join*) eingestellt ist.

13) Es wäre schön, wenn diese Stützen Schraublöcher hätten. Wir haben zwar bereits die XY-Position dieser Löcher (die Mittelpunkte der Kreise), aber sie befinden sich in den verschiedenen Z-Positionen, nämlich auf der Unterseite des Gehäuses. Wir brauchen sie aber auf der Oberseite der Stützen. Um diese Punkte in der Höhe zu verschieben, erstellen Sie einen neuen Sketch (*Create Sketch*) und klicken auf die Oberfläche einer der Stützen, um den Sketch auf dieser Ebene zu positionieren (**Bild 13**).

14) Um diese Punkte auf unseren neuen Sketch zu kopieren, wählen Sie *CREATE Project / Include Project* (**Bild 14**). Klicken Sie auf alle vier Punkte und bestätigen Sie mit *OK*. Wenn Sie die 3D-Ansicht drehen, schweben diese neuen Punkte über dem ursprünglichen Sketch.

15) Schließen Sie den Sketch, zeigen Sie *Body1* an und wählen Sie in der Symbolleiste das Bohrungswerkzeug *Hole* aus. Klicken Sie auf alle vier Punkte und setzen Sie die Bohrung (**Bild 15**). Stellen Sie *Hole Type* auf Gewindebohrung (*Tapped*) ein. Der Gewindetyp sollte für M3-Schrauben *ISO Metric profile* sein und *Size* sollte 3,0 mm betragen. Was die Tiefe betrifft, so sollen die Löcher nicht

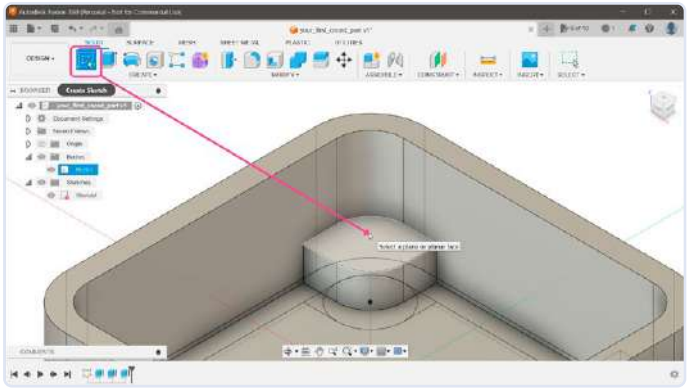


Bild 13. Einrichten der Gewindebohrung in den Schaubdom.

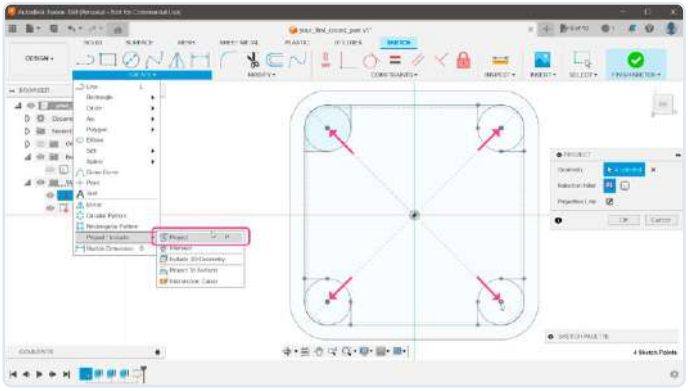


Bild 14. Wiederholen Sie den Vorgang für die anderen drei Ecken.

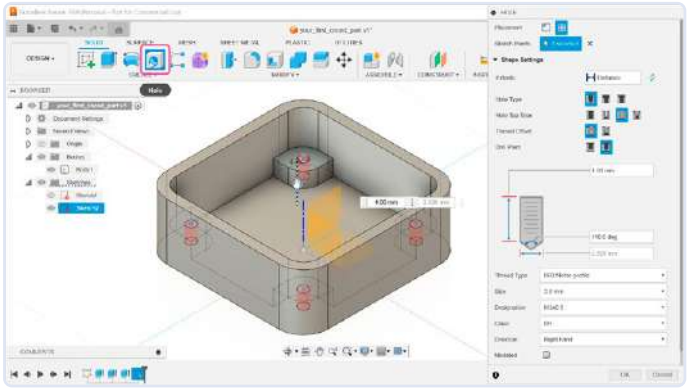


Bild 15. Einstellen der Tiefe und der Gewindearten für die Löcher.

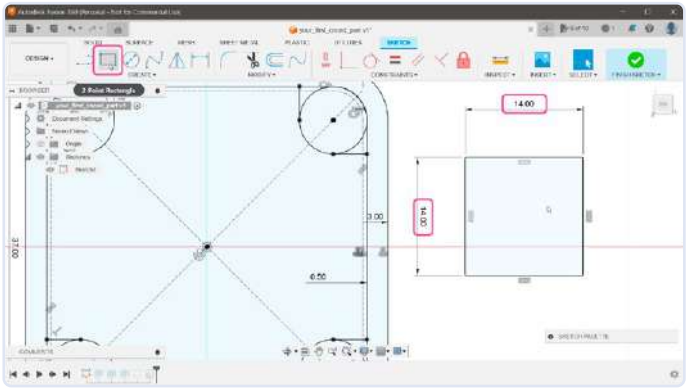


Bild 16. Vorbereitung der beiden Löcher auf der Unterseite des Gehäuses.

ganz durch die Stütze gehen. Da die Stützen 6 mm über die Grundfläche extrudiert werden, sollte eine Tiefe von 4 mm ausreichen.

16) Wir benötigen zwei rechteckige Löcher auf der Unterseite des Gehäuses, um Zugang zu den Anschlüssen auf der Unterseite der Platine zu erhalten. Die Anschlüsse sind zwar etwas unterschiedlich groß, aber ein Loch von 11 mm × 14 mm ist für beide Seiten geeignet. Wir müssen mit der Wandstärke (3 mm) rechnen, was die Lochgröße auf 14 mm × 14 mm festlegt. Um diese Löcher zu zeichnen, können wir unsere ursprüngliche Skizze wiederverwenden. Öffnen Sie sie zur Bearbeitung und wählen Sie das Werkzeug *2-Point Rectangle* (**Bild 16**) aus der Werkzeugleiste. Zeichnen Sie ein 14 mm × 14 mm großes Rechteck an einer beliebigen Stelle auf das Canvas.

17) Um das Rechteck an die richtige Position zu verschieben, wählen Sie in der Symbolleiste in der Gruppe *Constraint* das Werkzeug *MidPoint* (**Bild 17**). Klicken Sie zunächst auf die rechte Linie des neu erstellten Rechtecks, dann auf die rechte Linie der Gehäusewand. Dadurch wird erreicht, dass diese beiden Linien mittig ausgerichtet sind, und das Rechteck wird an die richtige Position verschoben. Wiederholen Sie die Schritte für das Loch auf der linken Seite und schließen Sie die Skizze.

18) Drehen Sie die 3D-Ansicht, um die Unterseite des Gehäuses zu sehen. Wählen Sie das Werkzeug *Extrude* (**Bild 18**) und dann die neu erstellten Rechtecke aus. Geben Sie einen Abstand von 6 mm ein, der der Höhe der Stützen entspricht. *Operation* sollte sich automatisch auf *Cut* umstellen.

19) Das Gehäuse ist fast fertig. Wir haben eine Grundform, Schraubdome mit Gewindelöchern und Löcher auf der Unterseite des Gehäuses für den Zugang zu den Platinenanschlüssen. An diesem Punkt wäre es angebracht, die Form ein wenig zu optimieren, um die Herstellung zu vereinfachen. Da das Fräswerkzeug immer einen bestimmten Durchmesser hat, ist es unmöglich, scharfe Innenkanten zu erzeugen. Dem können wir Rechnung tragen, indem wir mit dem Verrundungswerkzeug *Fillet* (**Bild 19**) aus der Gruppe *Modify* eine kleine Abrundung hinzufügen. Sobald das Werkzeug aktiv ist, wählen Sie alle „harten" inneren Ecken aus und geben einen kleinen Abrundungswert ein, zum Beispiel 2 mm.

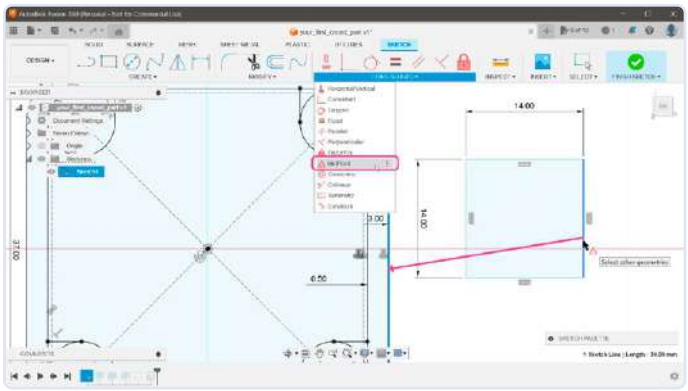


Bild 17. Zentrieren des Rechtecks mit der Funktion MidPoint.

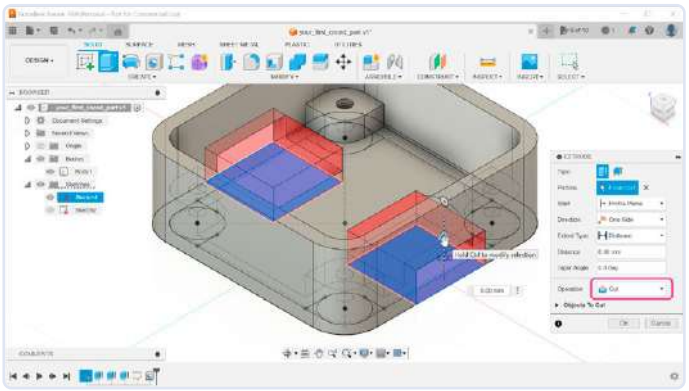


Bild 18. Extrudieren der beiden Ausbrüche.

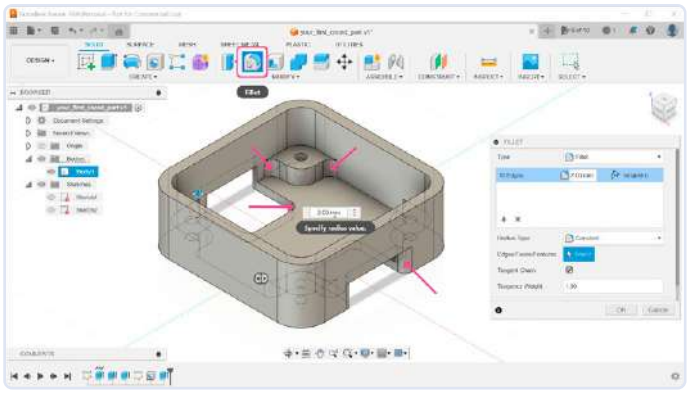


Bild 19. Abrunden der Innenkanten.

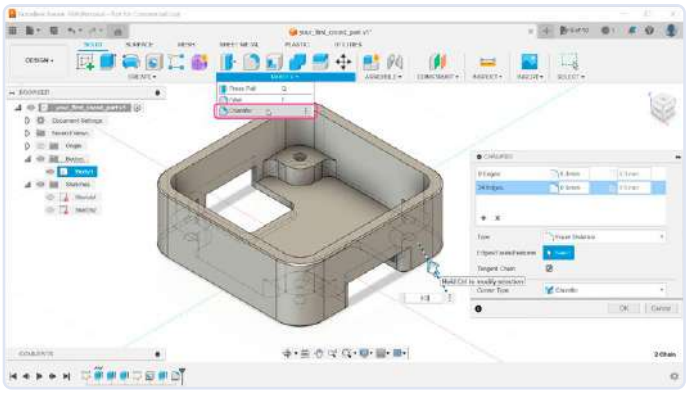


Bild 20. Glätten der Außenkanten.

20) Die scharfen Kanten auf der Außenseite können mit dem Fase-Werkzeug *Chamfer* geglättet werden. Wählen Sie es (**Bild 20**) aus dem Untermenü *Modify* und markieren Sie die Außenkanten des Gehäuses. Für die obere Kante habe ich einen minimalen Wert von nur 0,3 mm verwendet, für die untere Kante einen höheren Wert von 0,5 mm. Sie können mehrere Kanten mit unterschiedlichen Werten gleichzeitig fasen, indem Sie die Schaltfläche *Add Selection Set* im *Chamfer*-Dialog verwenden.

21) Jetzt ist das Gehäuse (**Bild 21**) bereit für die Fertigung. Ein gängiges Dateiformat für 3D-Zeichnungen ist eine STEP-Datei (.step), die über den Menüpunkt *File Export* exportiert werden kann. Mit dieser Datei fräst der gewählte Dienstleister [3] den realen Prototyp aus Vollmetall für Sie aus. Er ist in **Bild 22** mit anderen Komponenten in zwei verschiedenen Ausführungen zu sehen, mit eingesetztem Geber (**Bild 23**) und schließlich (**Bild 24**) als fertige Einheit. Ein umfassendes Video über die Schritte dieses Projekts finden Sie unter [4].

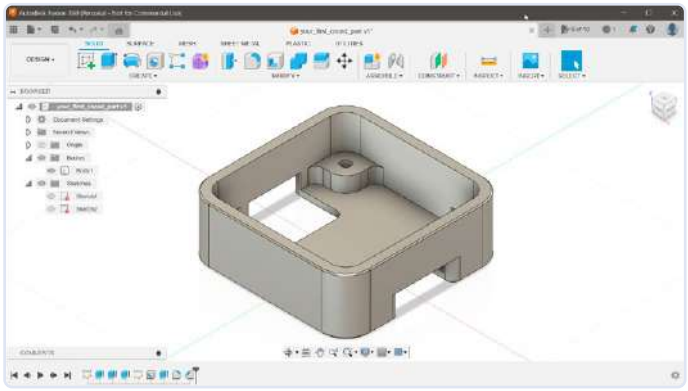


Bild 21. Das Gehäuse ist fertig für die Fertigung.

Es ist ja so einfach!

Autodesk Fusion 360 [1] ist eine komplexe Anwendung mit Dutzenden von Werkzeugen, aber dieses Tutorial hat Ihnen hoffentlich gezeigt, dass Sie zur Erstellung eines einfachen Gehäuses nur wenige dieser Werkzeuge verwenden müssen. Das gleiche Ergebnis kann in der Regel auf mehrere Arten erreicht werden. Solange es für Sie funktioniert, brauchen Sie sich also keine großen Gedanken darüber zu machen, ob es der richtige Ansatz ist. Jeder Hersteller ist bereit, auf kleine Probleme einzugehen, und wenn Sie sich bei etwas nicht sicher sind, fragen Sie nach.

Das Gehäuse aus diesem Tutorial wurde von PCBway [3] hergestellt und kostete 37 Dollar plus Versand. Darin enthalten sind das Perlstrahlen des CNC-gefrästen Teils (für eine glatte Oberfläche) und das Eloxieren (für eine bessere Oberflächenqualität und ein schönes Aussehen).



Bild 22. Die Gehäuse mit den anderen benötigten Teilen, kurz vor der Endmontage.



Bild 23. Das bearbeitete Gehäuse mit dem eingebauten Drehgeber.



Bild 24. Der vollständig montierte Prototyp.

Wenn Sie mit rohem Metall-Look zufrieden sind, können Sie ein paar Dollar sparen. Und wenn Sie einen lokalen Hersteller finden, können Sie wahrscheinlich auch beim Versand sparen. Viel Glück bei der Gestaltung Ihrer eigenen Gehäuse für Ihre großartigen Projekte!

RG — 230361-02



Über den Autor

Vaclav Krejci veröffentlichte seinen ersten (Online-) Tutorials im Jahr 1998 und setzte dies in den folgenden Jahren fort. Nach Hunderten von Tutorials zum Thema Grafik beschloss er, ein Buch mit dem Titel *GUI Design in Adobe Photoshop* zu schreiben, das 2007 veröffentlicht wurde. Dies führte zwar zu großartigen Möglichkeiten für GUIs, aber leider auch zu einer langen Verzögerung seiner Veröffentlichungstätigkeit. Während der Corona-Pandemie entdeckte Vaclav Arduino im Jahr 2020 sein wachsendes Interesse an der Elektronik. Er hat auch erkannt, dass es sehr hilfreich ist, seinen Lernprozess zu dokumentieren und in Tutorials umzusetzen, um Projekte zu beenden, die sonst für immer unvollendet bleiben würden. Seine wichtigste Plattform für Video-Tutorials ist zurzeit YouTube. Hoffentlich werden Vaclavs Projekte andere auf dem gleichen Weg inspirieren!

Fragen oder Kommentare?

Haben Sie Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Senden Sie eine E-Mail an den Autor unter info@upir.org oder kontaktieren Sie Elektor unter redaktion@elektor.de.



Passende Produkte

- **Anet 4540 Tisch-CNC-Fräsmaschine**
  www.elektor.de/20260
- **Arduino Uno SMD Rev3**
  www.elektor.de/19938

WEBLINKS

[1] Download-Seite Autodesk Fusion 360 Personal: https://autodesk.de/products/fusion-360/personal
[2] Drehgeber Gravity 360 von DFRobot: https://dfrobot.com/product-2575.html
[3] Website Link PCBway für CNC: https://pcbway.com
[4] Tutorial Video auf YouTube: https://youtu.be/EB8PISr4m4g
[5] Viel Spaß mit Autodesk: https://youtu.be/vNKx29qEyJ4

UNSER SORTIMENT
VON MAKERN FÜR MAKER

The best part of your project:
www.reichelt.de

Nur das Beste für Sie – von über 1.500 Markenherstellern

Unsere Produktmanager sind selbst Techniker, Ingenieure und Maker. Wir wählen von allen Herstellern nur die besten Produkte aus. Für Sie machen wir Innovationen und Techniktrends schnell verfügbar und für jeden bezahlbar.

Entwicklerboards – Kompakte Spezialisten für Elektronikprojekte



Raspberry Pi 5 B



Arduino UNO Rev4 WiFi



NVIDIA Jetson Nano Bundle

Gleich entdecken ▶ https://rch.lt/boards

TAGESPREISE! Preisstand: 18. 10. 2023

- Top Preis-Leistungs-Verhältnis
- über 130.000 ausgesuchte Produkte
- zuverlässige Lieferung – aus Deutschland in alle Welt

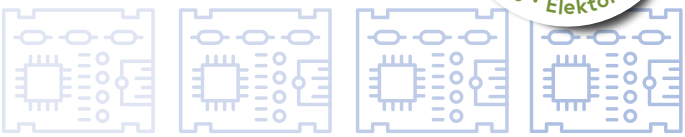
reichelt elektronik – The best part of your project

www.reichelt.de
Bestellhotline: +49 (0)4422 955-333

Es gelten die gesetzlichen Widerrufsregelungen. Alle angegebenen Preise in € inklusive der gesetzlichen MwSt., zzgl. Versandspesen für den gesamten Warenkorb. Es gelten ausschließlich unsere AGB (unter www.reichelt.de/agb, im Katalog oder auf Anforderung). Abbildungen ähnlich. Druckfehler, Irrtümer und Preisänderungen vorbehalten.
reichelt elektronik GmbH, Elektronikring 1, 26452 Sande, Tel.:+49 (0)4422 955-333

Platinenproduktion in kleinen Stückzahlen

Mit und ohne Bestückung



Von Saad Imtiaz (Elektor)

Sie haben also eine elektronische Schaltung inklusive Platine entworfen und getestet und wollen sie nun in (kleinen) Stückzahlen produzieren. Wenn Sie jedoch nicht die finanziellen Mittel haben, um einfach 10.000 vorbestückte Platinen zu bestellen und sie irgendwo zu lagern, von wo aus Sie sie in Ruhe verkaufen können, welche Möglichkeiten haben Sie dann?

Die erste Möglichkeit, die einem in den Sinn kommt, ist, die Platinen selbst zusammenzubauen. Das ist gut möglich, wenn die Stückzahl klein sind und die Platine nicht zu viele Bauteile hat (**Bild 1**). Das mag einfach klingen, aber es gibt ein paar Dinge zu bedenken, bevor Sie beginnen.

Beginnen Sie mit der Auswahl eines Unternehmens, das Platinen herstellt. Dies kann ein Pooling-Dienst sein (siehe Kasten **Pooling**), wenn Sie nur einige wenige Platinen benötigen. Wenn Sie jedoch (mehrere) hundert Platinen benötigen, ist es von Vorteil, die Angebote verschiedener Hersteller zu vergleichen, die keine Pooling-Dienste sind.

Beschaffen der Komponenten

Wenn Sie den Entwurfsprozess für die Platine in der richtigen Reihenfolge durchgeführt haben, verfügen Sie bereits über eine Bauteil- oder Materialliste (Bill of Materials, BoM), die für jede Zeile eine vollständige Herstellerreferenz und die Adresse eines Unternehmens enthält, bei dem Sie das Teil kaufen können. Ideal wäre es, die gesamte Stückliste bei einem einzigen Unternehmen einzukaufen, aber das ist in den meisten Fällen nicht möglich. Es werden verschiedene Lieferanten benötigt, um alle Bauteile zu beschaffen, und jeder Lieferant berechnet Versand- und Verpackungskosten. Durch geschicktes Einkaufen können Sie also Geld sparen. Gleichzeitig kostet es Sie aber auch Zeit, so dass es wichtig ist, diese beiden Aspekte gegeneinander abzuwägen.

Zusammenbau der Platine

Wenn Sie die Leiterplatten und die Bauteile haben, ist es an der Zeit, die Platinen zu bestücken. Haben Sie die dafür erforderlichen Werkzeuge? Ein kleiner Lötkolben (**Bild 2**) mag für den Zusammenbau eines Prototyps ausreichen, aber ist er auch dafür geeignet, zwanzig, fünfzig oder hundert Platinen komfortabel zu bestücken? Und die Bauteile – verwenden sie Durchsteckmontage, Oberflächenmontage, oder eine Mischung? Normalerweise sollte man es vermeiden, verschiedene Technologien zu mischen, da dies die Leiterplattenbestückung erschwert. Reine Oberflächenmontage ist gut, weil die Platine im Ofen gelötet werden kann. Die Platzierung solcher Bauteile auf der Leiterplatte ist jedoch eine heikle Aufgabe. Und da dafür Lötpaste benötigt wird – haben Sie eine Schablone bestellt, um sie richtig aufzutragen? Wie wollen Sie die Schablone auf Dutzenden von Platinen exakt ausrichten? Dies wird einfacher sein, wenn die Leiterplatten in einem Nutzen angeordnet sind.

Prüfen

Nach der Bestückung der Platinen müssen diese getestet werden. Dazu benötigen Sie eine geeignete Ausrüstung. Es kann sinnvoll sein, einen Prüfstand oder ein Programmiergerät zu bauen – oder sogar beides.

Verkaufen und Versenden

Wenn Sie schon einmal etwas auf einer Website wie eBay verkauft haben, wissen Sie, dass der Verkauf von Produkten komplizierter ist, als nur einen Käufer für das Produkt zu finden. Zum Verkaufen gehören auch die Rechnungsstellung, das Einpacken und Verpacken sowie der Versand, und all diese Dinge kosten Zeit und Geld.

Was sind die Optionen?

Die oben genannten Probleme müssen für jede Produktionsmethode, die Sie wählen, gelöst werden – von der Einzel- bis zur Massenproduktion. Und da die Herstellung von Platinen ein komplexer Prozess ist, gibt es viele Unternehmen, die Dienstleistungen anbieten, um Ihnen die Arbeit zu erleichtern. Natürlich hat alles seinen Preis, so dass es an Ihnen liegt, den richtigen Kompromiss zwischen Kosten, Zeit und Ihrem eigenen Seelenfrieden zu finden.



Bild 1. Leerplatine mit zu bestückenden Bauteilen.



Bild 2. Eine digitale Lötstation.

PCBA-Pooling

Einige Leiterplattenhersteller bieten einen Bestückungsservice an. Dabei handelt es sich um so genannte PCBA-Häuser, wobei das „A“ für „Assembly“, also Montage, steht. Anstatt eine nackte Leiterplatte anzufordern, können Sie also eine komplett bestückte Leiterplatte bestellen. Das klingt praktisch, oder? Das ist es auch, aber es hat nicht nur seinen Preis, sondern macht auch die Beschaffung von Bauteilen etwas komplizierter. Sie haben Ihre BoM, und das PCBA-Haus hat sein Inventar, und beides wird nicht in jeder Zeile übereinstimmen, und vielleicht nicht einmal in einer einzigen Zeile. Daher müssen Sie jedes Teil auf Ihrer Stückliste sorgfältig mit den Teilen abgleichen, die das Montageunternehmen vorschlägt. Dies ist eine zeitraubende Aufgabe. Und natürlich ist nicht jedes Teil auf Lager oder überhaupt verfügbar, was Kosten und Verzögerungen mit sich bringt. Um diesen Schritt zu erleichtern, können Sie Ihr Design schon im Vorfeld an den Bauteilbestand des Bestückungsdienstes anpassen.

Die meisten PCB-Pooling-Dienste bieten neben der Beschaffung von Bauteilen auch Bestückungsdienstleistungen an (**Bild 3**), was sehr hilfreich sein kann, um die hektische Aufgabe des Auffindens, Einsetzens und anschließenden Lötens der Bauteile zu erleichtern. Das Löten einiger weniger Leiterplatten kann Spaß machen, aber bei einer größeren Menge wird es schnell mühsam und langweilig. Die Bestellung einer Baugruppe ähnelt der Bestellung einer nackten Platine, aber der Hersteller verlangt einige zusätzliche Angaben, zum Beispiel die Anzahl der einzelnen Bauteile, die Anzahl der Teile für Durchsteck- und für Oberflächenmontage und so weiter (**Bild 4**). Die bewährte Methode ist, diese Informationen in die Baubeschreibung aufzunehmen und die Arten von Bauteilen neben ihrem Namen zu nennen. Dies vermeidet Fehler des Herstellers und spart Zeit bei der Auftragsabwicklung.

Der Hersteller wird Ihnen einen Kostenvoranschlag für den Montageservice machen, nachdem Sie Informationen über die Arten und Mengen der Bauteile et cetera angegeben haben. Dieser Kostenvoranschlag enthält nicht die Kosten für die Bauteile. Nachdem Sie Ihre Bestellung aufgegeben haben, wird sich das Support-Team des Herstellers mit Ihnen in Verbindung setzen und Sie darüber informieren, ob die Bauteile und ihre Referenzen in der BoM mit Ihrer Leiterplatte übereinstimmen. Sie erhalten dann einen Kostenvoranschlag für die Bauteile.

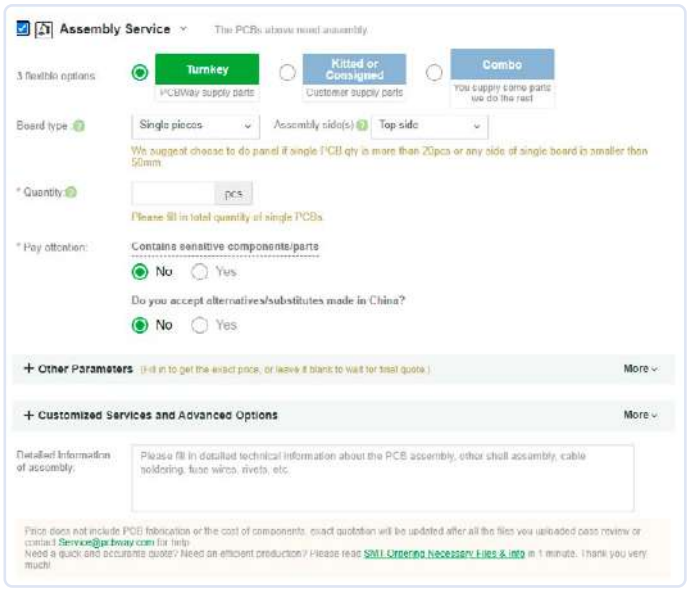


Bild 3. Verschiedene Montage-Services von PCBWay.

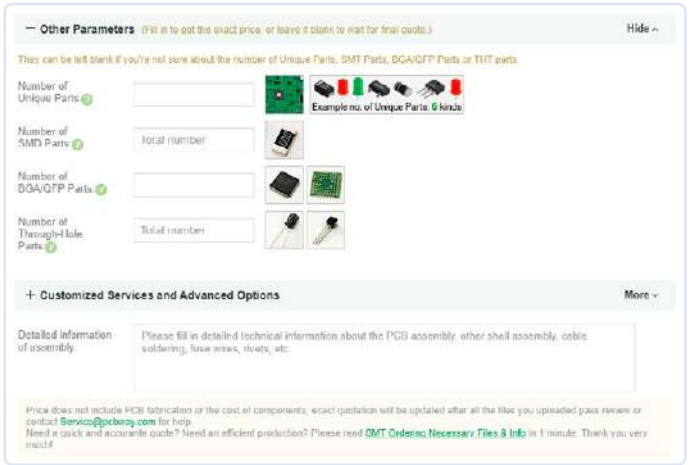


Bild 4. Weitere Parameter für Bestückungsdienstleistungen von PCBWay.

Pooling

Platinen werden in einem sogenannten Produktionsnutzen hergestellt. Ein und derselbe Nutzen kann Leiterplatten verschiedener Kunden mit denselben Spezifikationen herstellen. Diese Sammlung zusammengehöriger Aufträge wird als Pooling bezeichnet. Pooling fördert die Flexibilität und senkt die Herstellungskosten.

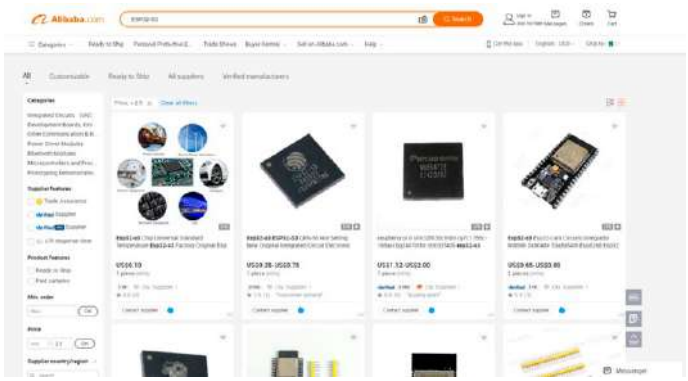


Bild 5. Chinesische Anbieter von Bauteilen und Komponenten auf Alibaba.

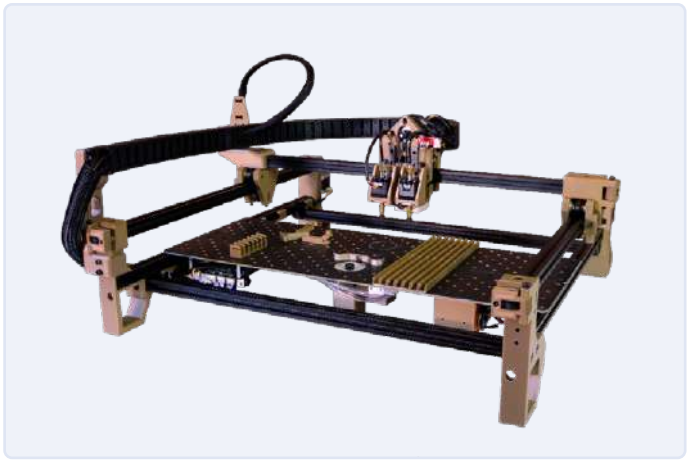


Bild 6. LumenPnP von Opulo.



Bild 7. Drucker eC-stencil-mate von Eurocircuits.

Um bei den Bauteilen Geld zu sparen, müssen Sie den Preis der Bauteile sorgfältig prüfen und ihn mit anderen Quellen wie Mouser, DigiKey und AliBaba vergleichen (**Bild 5**). Wenn die Bauteile zu einem fairen Preis erhältlich sind und der Hersteller die richtigen Bauteile anbietet, ist es sinnvoll, mit diesen Quellen zu arbeiten. In der Regel sind einige Bauteile nicht verfügbar, und einige liegen preislich über den normalen Kosten. In diesem Fall ist es besser, die Bauteile von Resellern auf AliBaba zu beziehen, da sie diese normalerweise zu einem viel niedrigeren Preis anbieten als PCB-Pooling-Dienste (und der Preis kann oft durch Verhandlungen mit dem Reseller weiter gesenkt werden). Am besten nehmen Sie Gespräche mit drei oder mehr Händlern auf, bevor Sie sich für den verifizierten Händler mit dem besten Angebot entscheiden. Nachdem Sie sich mit einem der Wiederverkäufer geeinigt haben, müssen die Bauteile an den PCB-Pooling-Dienst geschickt werden. Vergewissern Sie sich daher, dass die Adresse des Leiterplattenherstellers ordnungsgemäß auf das Paket gedruckt ist. Bitten Sie den Reseller, ein Bild des Pakets mit der Adresse und der Sendungsverfolgungsnummer zu übermitteln. So wird sichergestellt, dass alles in Ordnung ist und die Sendung verfolgt werden kann. Es ist auch sinnvoll, die Sendungsverfolgungsnummer und das Bild des Pakets an das Support-Team des Pooling-Dienstes weiterzugeben. So lassen sich Verzögerungen bei der Auftragsabwicklung vermeiden. Ein reibungsloser Montageprozess wird durch eine effektive Kommunikation sowohl mit dem Hersteller als auch mit dem Wiederverkäufer der Komponenten gewährleistet.

Fünf-Sterne-Dienste

Auf der anderen Seite gibt es Unternehmen, die Ihre BoM übernehmen und alle Teile für Sie einkaufen. Da diese Unternehmen viele Kunden haben, können sie in größeren Mengen einkaufen als Sie, was den Preis Ihrer BoM senkt. Diese Unternehmen können auch die Platinen für Sie bestellen, wodurch Sie eine weitere Aufgabe auf Ihrer Liste abhaken können. Die Unternehmen können die Leiterplatten auch für Sie bestücken und sie für Sie programmieren und testen. Einige bieten sogar die Lagerung und den Versand der Platinen für Sie an. Aber wie üblich haben diese Dienste ihren Preis. Auch wenn es sehr praktisch ist, gibt es einen Haken: Viele dieser Unternehmen nehmen nur Bestellungen ab etwa einhundert oder mehr Boards an, was für Ihr individuelles Vorhaben vielleicht zu viel ist. Außerdem kann es sein, dass sie nur professionelle Kunden annehmen. Das bedeutet, dass Sie zunächst ein Unternehmen gründen müssen.

DIY-Bestückung?

Die Leiterplatten selbst zu bestücken, kann die günstigste Lösung sein, wenn Sie die Stunden, die Sie dafür aufwenden müssen, nicht mitrechnen. Vor allem für SMD-Platinen gibt es inzwischen alle möglichen kostengünstigen Bestückungsgeräte, von kleinen Bestückungsautomaten über Lotpastendrucker bis hin zu Reflow-Öfen und Heizplatten. Für ein paar tausend Euro sind Sie direkt startklar. Aber lohnt sich eine solche Investition, wenn Sie nur hundert Platinen zu bestücken haben? Oder rechnen Sie mit Folgeaufträgen? Wenn nicht, ist ein Lötkolben die beste Lösung. Wenn ja, sollten Sie zumindest noch eine Lötrauchabsaugung kaufen.
Eine der Optionen für die Einrichtung Ihrer SMD-Bestückung ist LumenPnP von Opulo (**Bild 6**). Dabei handelt es sich um eine quelloffene Pick-and-Place-Maschine, die einfach einzurichten

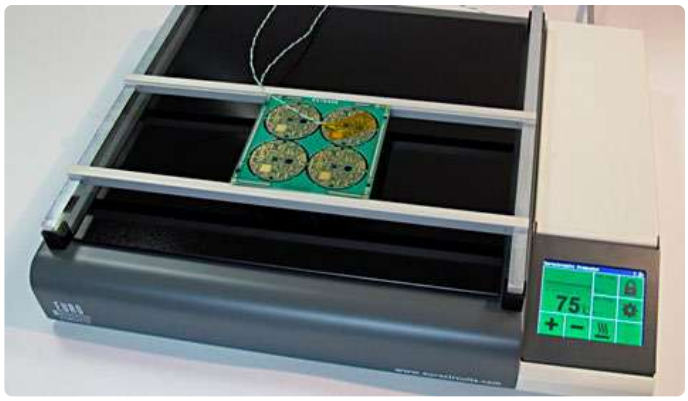


Bild 8. eC-pre-heater und eC-fume-fube von Eurocircuits.



Bild 9. Infrarot-Reflow-Ofen T-962.



Bild 10. Vollständig bestückte Leiterplatte: Der Elektor-Bausatz Linearer ±40 V-Spannungsregler.

Vergleich der verschiedenen PCB-Dienste

Beta Layout: Zeichnet sich durch sein umfassendes PCB-Serviceportfolio aus. Das Unternehmen bietet Optionen für die Leiterplattenfertigung, die Montage und sogar den 3D-Druck. Beta Layout bietet eine schnelle und zuverlässige Produktion mit einer großen Auswahl an Materialien und Finishes. Die benutzerfreundliche Website bietet einen Online-Viewer für Gerber-Dateien an, mit dem sich Entwürfe leicht überprüfen und verifizieren lassen. Darüber hinaus bietet Beta Layout ein Tool für den Design Rule Check (DRC) zur Unterstützung der Designvalidierung.
https://eu.beta-layout.com

Eurocircuits: Bekannt für seine hochwertigen PCB-Herstellungs- und Bestückungsdienste. Das Unternehmen bietet eine breite Palette von Optionen, einschließlich Prototypen und Produktionsläufe. Eurocircuits bietet außerdem eine benutzerfreundliche Online-Plattform mit sofortiger Preisgestaltung und kurzer Durchlaufzeit. Der starke Fokus auf den Kundensupport und die umfangreichen Design-Regelprüfungen gewährleisten optimale Ergebnisse. Eurocircuits bietet auch ein Visualisierungstool an, mit dem die Benutzer ihr Platinendesign vor der Fertigung überprüfen können.
https://eurocircuits.com

JLCPCB: Bekannt für seine wettbewerbsfähigen Preise und hochwertige Fertigung. Das Unternehmen bietet eine breite Palette von Optionen, darunter schnell umsetzbare Prototypen und größere Produktionsläufe. JLCPCB besitzt eine einfach zu bedienende Online-Bestellplattform und unterstützt mehrere Dateiformate. Die umfangreichen Qualitätskontrollverfahren wie die automatische optische Inspektion (AOI) gewährleisten eine zuverlässige Fertigung.
https://jlcpcb.com

OSH Park: Ein gemeinschaftsorientierter Leiterplattenservice, der für seine unverwechselbar lilafarbenen Leiterplatten bekannt ist. Das Unternehmen ist auf die Herstellung von Prototyp-Leiterplatten spezialisiert und bietet qualitativ hochwertige Ergebnisse mit viel Liebe zum Detail. OSH Park verfügt über eine benutzerfreundliche Website, auf der Benutzer ihre Entwürfe hochladen und eine visuelle Darstellung der gefertigten Leiterplatte ansehen können. Das Unternehmen legt großen Wert auf Transparenz und bietet gemeinsame Projekte für das Feedback der Community an.
https://oshpark.com

PCBWay: Wegen seiner erschwingliche Preise und schnellen Turnaround-Zeiten ein beliebtes Unternehmen für die Herstellung von Platinen in kleinen Stückzahlen. Das Unternehmen bietet einen optimierten Online-Bestellprozess mit Preisberechnung in Echtzeit und sofortigem Kostenvoranschlag. PCBWay unterstützt eine Vielzahl von PCB-Optionen, darunter flexible und starr-flexible Leiterplatten. Die Website bietet auch einen Online-Viewer für Gerber-Dateien und eine Funktion zur Überprüfung von Designregeln, um die Genauigkeit des Designs zu gewährleisten.
https://pcbway.com

Zusammenfassung und Empfehlungen:

Die Wahl des richtigen Pooling-Dienstes hängt von den spezifischen Projektanforderungen, dem Budget und den gewünschten Funktionen ab. Der Vergleich zwischen den oben genannten Pooling-Diensten zeigt, dass PCBWay bei einer Bestellung von zehn oder weniger Leiterplatten am günstigsten ist, aber darüber hinaus kostet jeder andere Dienst fast das Gleiche. JLCPCB liegt preislich an zweiter Stelle, wobei die anderen Dienste in der Regel auch recht günstige Preise bieten. Berücksichtigen Sie Faktoren wie Preisgestaltung, Fertigungsmöglichkeiten, Turnaround-Zeit, Qualitätskontrollmaßnahmen und Kundenbetreuung. Es ist auch von Vorteil, Feedback und Bewertungen der Nutzer für jeden Dienst zu beachten.

Tipps für ein besseres PCB-Design

Wenn Sie kosteneffiziente Platinendesigns anstreben, kann die Beachtung bestimmter technischer Details und Industriestandards Ihr Vorgehen erheblich verbessern. Hier sind einige wertvolle Tipps und Tricks, die Sie beachten sollten:

Leiterbahnbreite und -abstand: Befolgen Sie die IPC-2221-Norm für Richtlinien [1] zur Leiterbahnbreite und zur gewünschten Strombelastbarkeit. Halten Sie zwischen Leiterbahnen, Pads oder Komponenten einen Mindestabstand von 0,2 mm für Niederspannungsdesigns (<50 V) in einer Standardumgebung ein [2].

Fertigungstoleranzen: Halten Sie bei Ihrem Entwurf die vom Hersteller angegebenen Fertigungstoleranzen ein. Abmessungen, Abstände und Lochgrößen für Bauteile und Durchkontaktierungen müssen innerhalb der zulässigen Grenzen liegen, damit Probleme bei der Herstellung vermieden werden können.

Impedanzkontrolle: Für Hochfrequenzdesigns oder Anwendungen, die eine kontrollierte Impedanz erfordern, berechnen Sie die Leiterbahnbreite und den Abstand auf der Grundlage der gewünschten charakteristischen Impedanz, der Dielektrizitätskonstante des Substrats und der Dicke der Kupferbeschichtung. Verwenden Sie Online-Rechner oder spezielle Software-Tools, um genaue Leiterbahnabmessungen zu bestimmen.

Ausrichtung von Lötmaske und Siebdruck: Achten Sie auf die korrekte Ausrichtung der Lötstoppmaske und der Siebdruckschichten. Ihr Entwurf muss die vom Hersteller vorgeschriebene Ausrichtungstoleranz berücksichtigen, damit das optische Erscheinungsbild eingehalten werden und die Herstellung problemlos erfolgen kann.

Nutzen: Optimieren Sie die Produktion von Kleinserien, indem Sie mehrere Platinen auf einem einzigen Nutzen unterbringen. Befolgen Sie auch hier die Herstellerrichtlinien, um eine effiziente Fertigung und Kostenreduktion zu gewährleisten.

Bauteil-Footprints: Verwenden Sie standardisierte Bauteilprofile, um Kompatibilität zu gewährleisten und die Herstellungskosten zu senken. Die Profile müssen mit den spezifischen Komponenten übereinstimmen, die Sie verwenden wollen. Konsultieren Sie die Industriestandard-Bibliotheken und/oder die Empfehlungen der Bauteilehersteller, um eine angemessene Genauigkeit zu erzielen.

Testbarkeit: Entwerfen Sie die Platine [3] unter Berücksichtigung der Testbarkeit, um die Kosten für Tests und Fehlersuche zu reduzieren. Nehmen Sie Testpunkte, Anschlussmöglichkeiten für Tastköpfe und integrierte Selbsttestfunktionen (Built-In Self-Test, BIST) auf, wo dies möglich ist. Dies ermöglicht ein effizientes Testen während der Fertigung und minimiert den Bedarf an kostspieliger Nacharbeit oder Fehlersuche.

und kostengünstig ist und vor allem nicht zu viel Platz in Ihrem Arbeitsbereich benötigt. Das macht das Gerät zu einer guten Wahl auch für Maker und Hobbyisten. Andere Open-Source-Optionen sind OpenPnP und SimplePnP.

Die Beschaffung und Verwendung dieser PnP-Lösungen ist nicht das Ende der Geschichte, sondern eröffnet ein ganz neues Kapitel. Sie benötigen eine komplette Einrichtung und einen Prozessablauf, einschließlich der Handhabung von Schablonen für Lötpaste (**Bild 7**), eine Leiterplattenvorheizung (**Bild 8**), einen Reflow-Ofen (**Bild 9**) und eine Vorrichtung zum Testen der Baugruppe. Das hört sich nett an, aber bitte beachten Sie, dass diese Werkzeuge für Ihre Leiterplatte eingerichtet und konfiguriert werden müssen. Sie müssen Testläufe durchführen, um sicherzustellen, dass die Konfiguration und die Einstellungen korrekt von Ihrem Leiterplattenentwurf übernommen werden. Fügen Sie dann die Bauteile in die Zuführungen ein und überwachen Sie den Prozess, um zu prüfen, ob die PnP-Maschine ordnungsgemäß läuft, ausreichend Bauteile hat und die Bauteile an den richtigen Stellen einsetzt. Dies kann den Arbeitsaufwand im Vergleich zum manuellen Löten verringern, aber es kann auch mühsam sein, weil es eine ständige Überwachung erfordert, wenn Sie nicht nach einer Kaffeepause enttäuscht werden wollen. Alles in allem ist das eine nette Einrichtung, aber wenn Sie diesen Weg nicht einschlagen wollen, haben Sie immer die Möglichkeit, PCBA-Dienstleistungen in Anspruch zu nehmen. Unabhängig davon, für welche Option Sie sich entscheiden, der Anblick einer vollständig bestückten Leiterplatte (**Bild 10**) ist immer befriedigend!

Übersetzung von Matze Schrumpf -- 230477-02

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Wenn Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel haben, wenden Sie sich bitte an die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.

Passende Produkte

- **Voltera V-One Desktop-PCB-Drucker**
  www.elektor.de/18250
- **Verbesserter T-962 Infrarot-Reflow-Ofen (Elektor-Version)**
  www.elektor.de/20346
- **Digitale Entlötstation ZD-915**
  www.elektor.de/20142
- **Weller ESF 120ESD Platinenhalter**
  www.elektor.de/17481

WEBLINKS

[1] Anwendung der IPC-2221-Normen im Leiterplattendesign (PDF): https://tinyurl.com/ipc2221a
[2] PCB-Footprint-Muster nach IPC-7351-Standard: https://t1p.de/ss6as
[3] Praktische PCB-Layout-Tipps, die jeder Designer kennen muss: https://tinyurl.com/pcbtips

JETZT VORBESTELLEN!

SPECTRAN® V6

BEYOND REALTIME

REALTIME SPECTRUM ANALYZER 5G

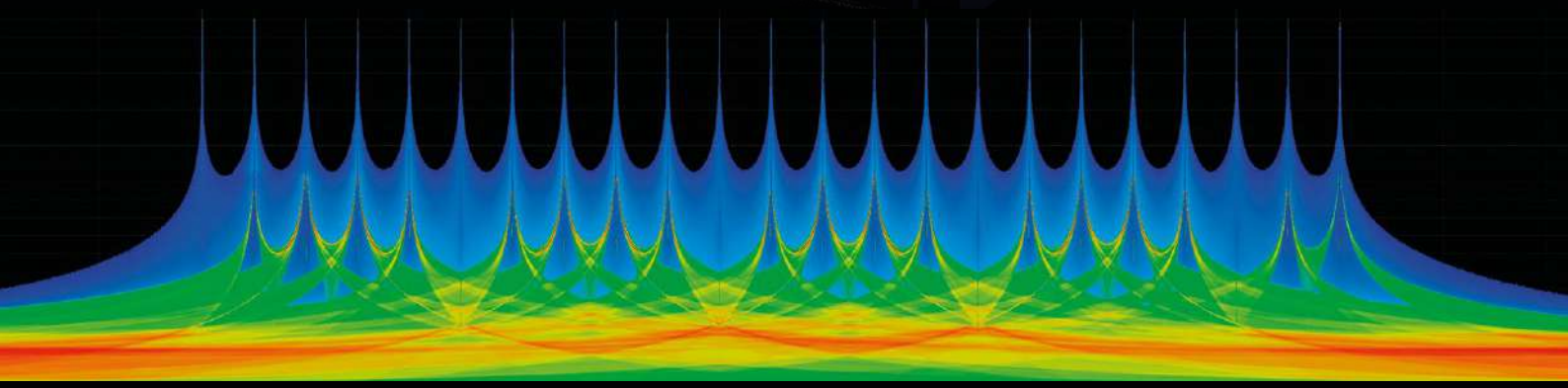
53 GHz USB Echtzeit-Spekrumsanalysator (FR1 & FR2)

250 MHz - 53 GHz | Dual-Receiver | **3 THz/s** sweep | **450 MHz** IBW | **16-Bit 2 GSPS** ADC | **IQ** streaming

-170 dBm/Hz DANL (4 dB NF) | Kompakter **USB** Formfaktor | Inkl. **RTSA-Suite PRO** software



Jedes Gerät enthält die weltweit fortschrittlichste Spektrumanalysesoftware **"RTSA-Suite PRO"**.



MADE IN GERMANY

www.aaronia.com
mail@aaronia.de
+49 6556 900 310

AARONIA AG
WWW.AARONIA.DE

IoT-Simulation vereinfacht mit Wokwi

Entwickler Uri Shaked über Entwicklung, Software und mehr

Fragen von Roberto Armani (Elektor)

Sie möchten Prozessoren und Boards simulieren? Dann sollten Sie sich Wokwi ansehen, einen innovativen Open-Source-Simulator für eingebettete Systeme und IoT-Geräte. Wokwis Schöpfer, Uri Shaked, spricht über seine Lösung sowie über seinen Hintergrund und seine Interessen.

Elektor: Zunächst einmal vielen Dank für Ihre Zeit, Uri. Können Sie uns etwas über sich und Ihren Hintergrund erzählen? Wo befinden Sie sich derzeit?
Uri Shaked: Ich bin Software-Ingenieur und lebe in Israel. Als Kleinkind habe ich immer meine Spielsachen zerlegt, weil ich neugierig war, wie sie funktionieren. In der dritten Klasse machte ich meinen PC/XT-Rechner kaputt. Ich wollte unbedingt lernen, wie man ihn repariert, und so kaufte mir meine Tante ein Buch über MS-DOS. Die letzten beiden Kapitel waren eine kurze Einführung in QBasic. Ich wurde süchtig. Von diesem Zeitpunkt an habe ich jeden Tag programmiert.

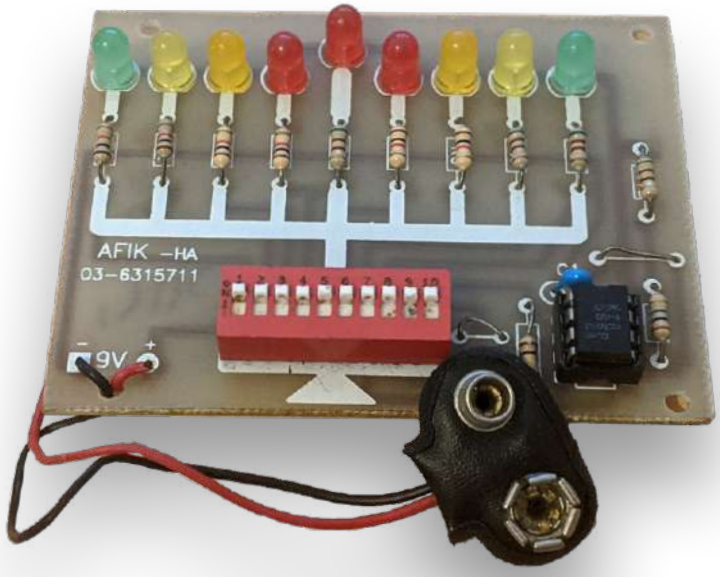


Bild 1. Mein Chanukka-Menora-Projekt, das ich in der vierten Klasse zusammengebaut habe und das immer noch funktioniert!

Elektor: Was hat Ihr Interesse an der Elektronik geweckt? War es ein bestimmtes Projekt, ein bestimmter Kurs, die Leidenschaft eines Verwandten für Elektronik oder vielleicht ein Lehrer?
Uri Shaked: In der Grundschule hatten wir wöchentlich einen Elektronikkurs. Er war sehr praxisorientiert: Wir lernten, wie man lötet und Platinen bestückt, die uns der Lehrer gab, und lernten dabei die Grundlagen kennen. Ich erinnere mich noch gut daran, wie sehr ich diesen Unterricht liebte, und an das Gefühl der Erfüllung, wenn ich ein Projekt fertig in der Hand hielt (**Bild 1**). In der Tat vermittelten diese Praktika das grundlegende Wissen und die Erfahrung und weckten in mir die Leidenschaft.

Elektor: Niemand vergisst seine „erste Liebe“. Erzählen Sie uns von Ihrem ersten funktionalen Elektronikprojekt. Woran haben Sie gearbeitet und warum?
Uri Shaked: Als ich in der achten Klasse war, verbrachte ich viel Zeit auf IRC-Chat-Servern. Eines Tages zeigte mir ein Freund einen Link, in dem erklärt wurde, wie man ein Lautsprechersystem aus alten Festplatten bauen kann, indem man den Antriebsmotor der Festplatte direkt an einen Verstärker anschließt. Ich war von der Idee fasziniert und beschloss, meinen eigenen Lautsprecher zu bauen. Die Klangqualität war nicht perfekt, aber nach einigem Ausprobieren fand ich heraus, dass ein schwerer Kochtopf auf der Festplatte die Klangqualität und Lautstärke erheblich verbesserte (der Klang hallte durch den Körper des Topfes). Am Ende hatte ich einen Turm von Töpfen im Wohnzimmer stehen, über den ich die Pink-Floyd-Platten meiner Mutter abspielte. Unnötig zu sagen, dass meine Mutter darüber nicht erfreut war. Im Laufe der Jahre tauchten die Festplatten immer wieder als Thema in meinen Projekten auf,

zum Beispiel in meinem ersten MCU-Projekt, einer festplattenbasierten PIC18-Dauersichtanzeige, oder, wie Sie in **Bild 2** sehen können, in einem meiner ersten Arduino-Projekte, einem festplattenbetriebenen Xylophon [1], das Lieder auf recycelten Bier- und Weinflaschen spielte.

Elektor: Ingenieure und Programmierer lernen eine Menge aus ihren Fehlern. Hat sich eines Ihrer Projekte in eine Katastrophe verwandelt? Können Sie etwas über dieses schwierige Projekt erzählen?
Uri Shaked: Auf jeden Fall mein GeekCon-Projekt. GeekCon ist eine Wochenendveranstaltung, bei der sich eine Gruppe von Nerds zusammenfindet, um nutzlose, aber coole Dinge zu bauen. Das Ziel ist es, zu scheitern - nach dem Motto: „Wenn dein Projekt nicht gescheitert ist, hast du dir nicht genug Mühe gegeben." Im Jahr 2018 haben wir versucht, einen Roboter zu bauen, der Trompete spielt [2]. Wir benutzten einen mit Wasser gefüllten Latexhandschuh als „künstliche Lippen", ein Nudelglas als Luftstromregler und Hochleistungs-Servomotoren mit Metallgetriebe, um die künstlichen Finger zu steuern (**Bild 3**). Eine Minute vor der abschließenden Projektpräsentation gab es ein Leck, und zwei der Servomotoren gaben einfach den Geist auf. Ein epischer Fehlschlag. Ich mag es nicht, wenn man versagt, also ging ich nach Hause und verbrachte den nächsten Monat damit, den Roboter zu reparieren, und versprach, ihn zur jährlichen Entwicklerveranstaltung von Chrome, dem *Chrome Dev Summit*, mitzubringen. Schließlich fand ich heraus, wie ich einen robusten Fingermechanismus bauen konnte, aber der Lippenmechanismus war so knifflig, dass ich ihn nicht zum Laufen bringen konnte. Am Ende habe ich geschummelt und einen Raspberry Pi verwendet, der vorher aufgenommene Trompeten-Samples über das Mundstück abspielte. Aber zumindest klang das Endergebnis anständig, und mein Roboter sorgte für reichlich Unterhaltung bei den Teilnehmern des Chrome Dev Summit [3].

Elektor: Jemand hat einmal gesagt: „Ein sauberer Schreibtisch ist ein Zeichen für einen kranken Geist." Wären Sie so mutig, uns ein Bild von Ihrem Arbeitsplatz zu zeigen?
Uri Shaked: **Bild 4** zeigt, wie mein Schreibtisch aussah, als ich versuchte, eine reale Version des Spiels „Offline Dinosaur" [4] von Google Chrome zu bauen. Mein eigentliches Problem war die Lagerung von Teilen. Ich hatte mehr als 4.600 Gegenstände, die in 40 verschiedenen Aufbewahrungsboxen aufbewahrt wurden, die in mehreren Excel-Tabellen erfasst waren und wertvollen Platz in meiner kleinen Wohnung beanspruchten. Letztes Jahr zogen wir um, und ich beschloss, fast alles an einen lokalen Makerspace zu verschenken. Heutzutage verwende ich hauptsächlich virtuelle Teile. Ich habe immer noch ein paar



Bild 2. Ein festplattenbetriebenes Xylophon.



Bild 3. Mein Freund Avi mit unserem Trompetenroboter, nur wenige Sekunden bevor er in die Luft ging!



Bild 4. Mein aufgeräumter und ordentlicher Arbeitsbereich…

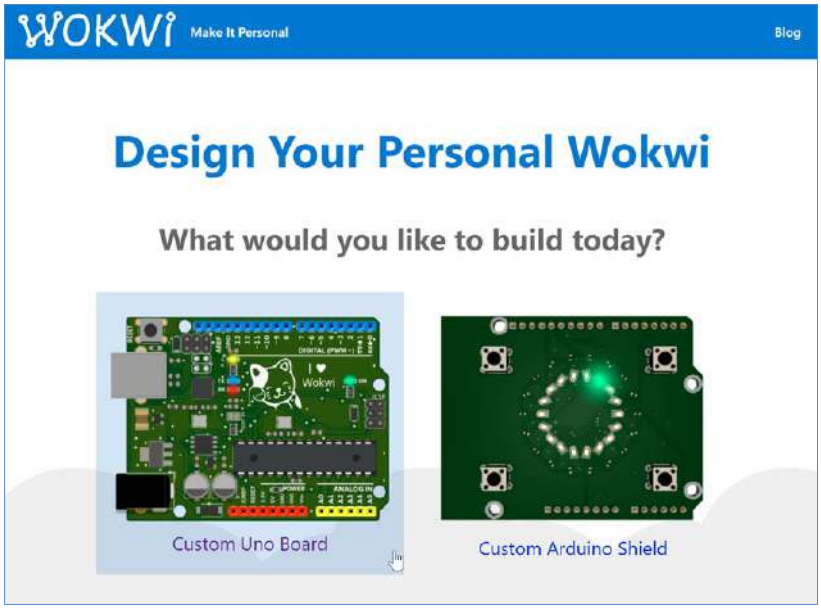


Bild 5. Die alte Wokwi-Homepage.

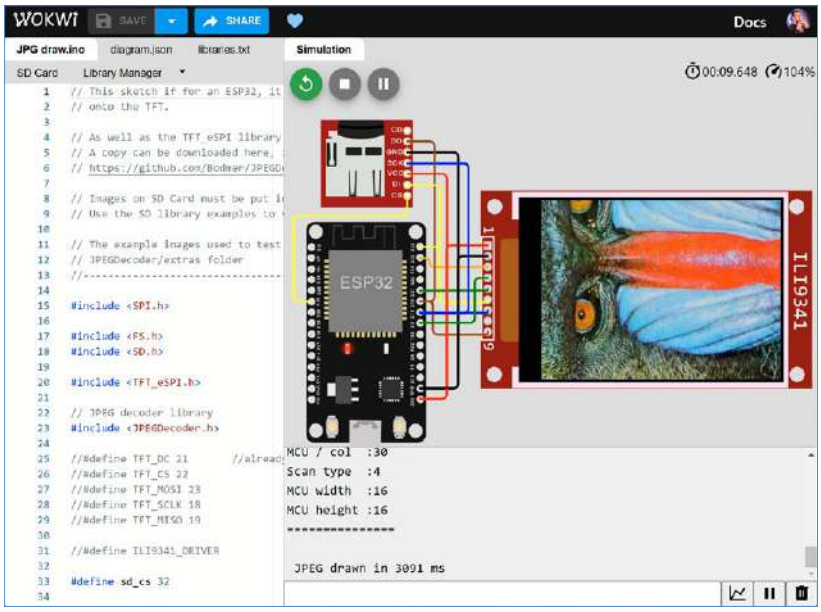


Bild 6. Wokwi heute.

Raspberry Pis, einen Saleae-Logikanalysator und eine kleine Sammlung von MCU-Boards (ESP32, STM32, Pi Pico und Arduino). Dies ermöglicht es mir, das physische Verhalten der Chips mit dem simulierten zu vergleichen.

Elektor: Wenn Sie Anfängern ein paar „Tipps und Tricks" für die Einrichtung eines richtigen Werkplatzes geben müssten, was würden Sie sagen?
Uri Shaked: Besorgen Sie sich ein gutes Netzteil!

Elektor: Ok, weiter zu Wowki. Was ist das? Woher kommt der Name? Was hat Sie dazu veranlasst, es zu schaffen?
Uri Shaked: Wokwi ist ein Simulator für eingebettete Systeme und IoT-Geräte. Es gibt eine kostenlose Online-Version sowie ein Plugin für Visual Studio Code. Wokwi kann ESP32, Raspberry Pi Pico, STM32, Arduino und eine Reihe anderer Mikrocontrollerboards simulieren, sowie eine Vielzahl von Eingabe- und Ausgabegeräten: LC-Displays, Sensoren, Motoren, LEDs, Tasten, Lautsprecher, Potentiometer und mehr. Wie Sie in **Bild 5** sehen können, begann Wokwi als ein Dienst, mit dem Sie maßgeschneiderte Arduino-Boards [5] herstellen konnten, mit einer einfachen Drag-and-Drop-Schnittstelle. Man beginnt mit einer Platinenvorlage, fügt Peripherie (LEDs, Sensoren und so weiter) hinzu, platziert diese auf der Platine, und wir verwandelten Ihren Entwurf in eine Leiterplatte, fertigten und montietren sie und schickten sie Ihnen. Ich habe angefangen, über Arduino zu bloggen, um das Thema zu verbreiten, und ich wollte unbedingt interaktive Live-Demos in meine Artikel einbauen. Ich konnte keine gute Lösung finden, um Arduino-Projekte zu teilen und sie im Web zu simulieren, also begann ich mit der Arbeit an einer Open-Source-JavaScript-Bibliothek, die den ATmega328P-Mikrocontroller simulieren konnte. Und der Rest ist Geschichte. In **Bild 6** können Sie sehen, wie Wokwi heute aussieht. Der Name sollte ein kurzes, leicht auszusprechendes Wort sein, das noch keine Bedeutung hat: Wokwi.

Elektor: Wer nutzt Wokwi? Ist die Nutzung völlig kostenlos?
Uri Shaked: Etwa 55 % der Nutzer sind Hobbybastler, 35 % sind Studenten und Lehrer (sowohl an Universitäten als auch an Gymnasien), und 10 % sind professionelle Firmware-Ingenieure. Einige beliebte Anwendungsfälle sind das Prototyping von IoT-Systemen (MQTT, Blynk, Thingsboard, IBM Cloud), Online-Kurse und -Workshops (beispielsweise der Kurs *Making Embedded Systems*), und wir sehen ein wachsendes Interesse der *Embedded Rust* Community. Wokwi hat eine kostenlose Version und eine kostenpflichtige Version (*The Club*). Schon die kostenlose Version ist sehr leistungsfähig und verfügt über die gleichen Simulationsmöglichkeiten wie die kostenpflichtige, aber letztere bietet zusätzlich das Hochladen von Dateien und Bibliotheken, lokale Vernetzung für den ESP32 und die Möglichkeit, private (nicht gelistete) Projekte zu speichern.

Elektor: Welche Teile oder Aspekte der Entwicklung und Leitung des Wokwi-Projekts haben sich als die größten Herausforderungen erwiesen?
Uri Shaked: Wokwi zielt darauf ab, komplexe Systeme einfach zu machen und eine großartige Benutzererfahrung zu bieten. Anstatt Compiler und Betriebssystemtreiber herunterzuladen und zu installieren, sich mit Berechtigungen, fehlerhaften USB-Kabeln und wackeligen Breadboard-Verbindungen herumzuschlagen, klickt man einfach auf einen Knopf. Ihr Code wird auf „magische" Weise kompiliert, und Sie können das Ergebnis in Ihrem Webbrowser sehen. Für diese „Es funktioniert einfach"-Erfahrung mussten und müssen wir uns selbst um viele der komplexen Dinge kümmern. Wir richten die Compiler-Tool-

chain in der Cloud für mehrere Plattformen ein (Rust, Arduino, esp-idf, Verilog ...), sorgen dafür, dass sie im großen Maßstab schnell läuft (wir führen etwa 2,3 Millionen Kompilierungen pro Monat durch), und suchen nach mysteriösen Fehlern. Letzten Monat verbrachte ich beispielsweise einen Tag damit, herauszufinden, warum die Verwendung einer bestimmten Bibliothek in einem Arduino-Projekt den Server zum Absturz brachte. Es stellte sich heraus, dass es ein Problem mit der Arduino-CLI [6] gab, das beim Versuch, diese Bibliothek zu installieren, zum Absturz führte. Eine großartige Benutzererfahrung zu bieten bedeutet auch, den Benutzern zu helfen, herauszufinden, warum der Code nicht so funktioniert, wie sie es erwarten. Ich denke, wir haben noch einen langen Weg vor uns, aber Funktionen wie der virtuelle Logic-Analyzer und die kürzlich hinzugefügte *Pin Function Dump*-Funktion sind definitiv ein Schritt nach vorn.

Elektor: Haben Sie ein bevorzugtes „Featured Simulation Project"? Erzählen Sie uns davon.
Uri Shaked: Schwer zu wählen, aber wenn ich mich für eines entscheiden müsste, dann wäre es *32 Servos Dancing* [7], das auch in **Bild 7** zu sehen ist - ein Arduino Mega, der 32 Servos steuert und ihre Arme animiert. Das Projekt ist eher ein Kunstprojekt als nützlich, genau das, was ich an diesem Projekt liebe. Um es im echten Leben zu bauen, bräuchte man ein starkes Netzteil und müsste ein paar hundert Euro für Teile ausgeben, aber im Simulator ist es ein Kinderspiel. Klicken Sie einfach auf *Play* und sehen Sie es in Aktion. Um die Sache aufzupeppen, wurde sogar das Diagramm für dieses Projekt durch den Arduino-Code generiert. Werfen Sie einen Blick auf die Funktion `GenerateDiagram()`, die trigonometrische Funktionen zur Platzierung der Servos verwendet. Sie gibt eine JSON-Datei aus, die Sie dann in *diagram.json* in Ihr Wokwi-Projekt einfügen können und die sowohl die Schaltung als auch ihre visuelle Darstellung enthält. Das nenne ich innovative Technik! Apropos Kreativität der Benutzer: Wokwi bietet eine *Custom Chips API* [8], mit der Sie neue Simulationsmodelle für Bauteile programmieren können, die noch nicht in der Simulation vorhanden sind. Die API bietet eine Framebuffer-Schnittstelle, mit der Sie Ihre eigenen Displays (LCD, E-Paper et cetera) erstellen können. Was ich aber nicht erwartet habe, ist, dass Benutzer ihr eigenes Oszilloskop mit Hilfe der Framebuffer-Schnittstelle erstellen (**Bild 8**).

Elektor: Der ESP32 ist ein ziemlich komplexes Modul. Erzählen Sie uns, wie Sie den ESP32 in Ihr Projekt integriert haben. War es schwierig?
Uri Shaked: Wow, das war eine schwierige Aufgabe. Der ESP32 verwendet den Xtensa-Befehlssatz mit über 250 Befehlen. Der erste Schritt bestand darin, Code zu schreiben, um jeden dieser Befehle zu dekodieren und zu simulieren, was am Ende auf etwa 4.500 Zeilen Code hinauslief. Dann erstellte ich eine Bridge zum *GNU Project Debugger*, um den im Simulator laufenden Code zu debuggen, und begann mit der Arbeit an den Peripheriebausteinen des Chips. Mein erstes Ziel war es, das ROM und den Bootloader zu überwinden und die Hello-World-Anwendung der ESP-IDF aus zu starten. Nachdem ich UART, SPI, die Timer (TIMG) und einige andere obskure Peripherie (DPORT, EFUSE) implementiert hatte, habe ich endlich die erste brauchbare Ausgabe von der seriellen Konsole des Simulators erhalten. Die größte Herausforderung war jedoch die Simulation des WLANs. Im Gegensatz zu anderen Teilen des Chips ist weder die WLAN-Peripherie dokumentiert noch der Quellcode der Treiber verfügbar. Es erforderte Wochen intensives Reverse Engineering [9], um herauszufinden, welche Register den WLAN-Funkbaustein steuern und wie man sie korrekt simulieren kann. Die harte Arbeit hat sich jedoch gelohnt - der ESP32 ist mittlerweile der beliebteste Chip auf Wokwi, und Espressif, die Firma hinter dem ESP32, unterstützt das Projekt sehr. Ihre Ingenieure treiben den Rust-Support voran, nutzen Wokwi in ihren Schulungen und Workshops und verbreiten den Simulator sogar auf Fachkonferenzen.

Elektor: Erzählen Sie uns von der Reaktion der Nutzer auf Wowki. Wie gehen Sie mit deren Feedback um?

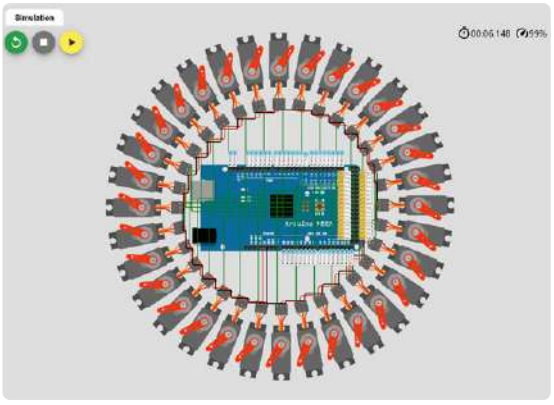


Bild 7. 32 tanzende Servos, gesteuert von einem Arduino Mega Board.

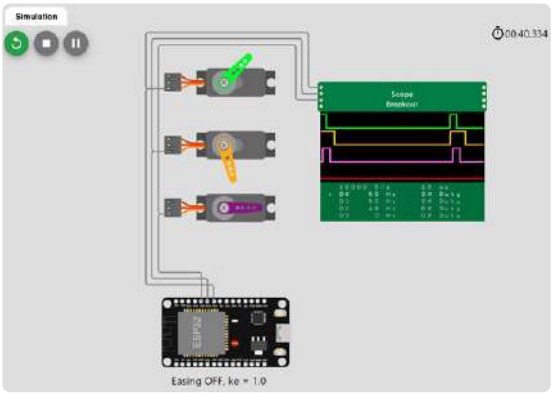


Bild 8. Der Scope-Chip, der Servosignale in Echtzeit anzeigt.

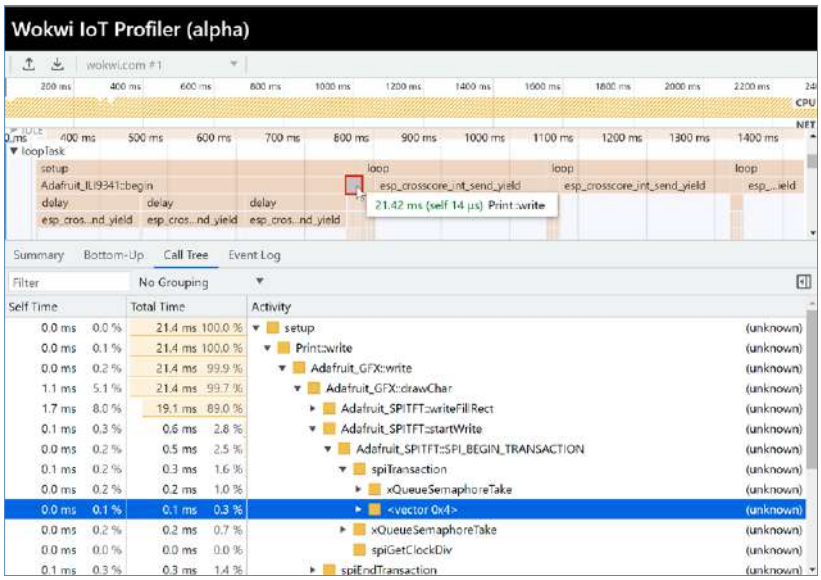


Bild 9. Wokwi Embedded Profiler.



▲

Bild 10. Die Disketten, mit einer Nahaufnahme der Elektronik (zwei EEPROMs, Schreibschutz-Lötbrücken und eine Anzeige-LED).

Uri Shaked: Unsere Nutzer sind im Allgemeinen mit dem Simulator zufrieden, weil er ihnen eine Menge Arbeit und Zeit erspart. Aber sie fragen auch immer nach mehr und mehr Funktionen, viel mehr, als unser kleines Team bewältigen kann. Um uns auf das zu konzentrieren, was für die Benutzer wirklich wichtig ist, habe ich die Seite „Vote for new features" [10] erstellt. Jeder kann neue Funktionen vorschlagen, und die Nutzer können für Funktionen stimmen, die ihnen wichtig sind. Das hilft uns, Prioritäten zu setzen, und es ist auch eine gute Möglichkeit für die Nutzer, zu sehen, was als nächstes kommt.

Elektor: Wo möchten Sie Wokwi in den nächsten sechs bis zwölf Monaten sehen?
Uri Shaked: Ich würde mir wünschen, dass Wokwi bei den professionellen Nutzern mehr Anklang findet. Anfang des Jahres habe ich Wokwi für Visual Studio Code veröffentlicht. Damit können Sie die Simulation direkt in Ihrer IDE ausführen und den Code viel schneller iterieren. Ich sehe bereits, dass Rust-Entwickler damit ihre Produktivität steigern. Wokwi kann auch mit dem Debugger in VS Code integriert werden, und im Gegensatz zu echter Hardware können Sie mit Wokwi eine beliebige Anzahl von Haltepunkten setzen. Ich arbeite derzeit an einem neuen eingebetteten Profiler (**Bild 9**). Wokwi verfolgt den Code, während er im Simulator ausgeführt wird, und man kann sehen, welche Funktionen in welcher Reihenfolge aufgerufen werden und wie viel Zeit der Mikrocontroller in jeder Funktion verbringt. Ich plane auch, die ESP32-Reihe zu erweitern (mit ESP32-H2, ESP32-P4), neue STM32-Bausteine hinzuzufügen und vielleicht auch mit weiteren Halbleiteranbietern in Kontakt zu treten, um deren Mikrocontroller ebenfalls aufzunehmen. Schließlich würde ich gerne sehen, wie Wokwi in CI-Umgebungen (Continuous Integration) eingesetzt wird. Die Idee dabei ist, den eingebetteten Code bei jeder Übertragung zu testen. Das ist mit Wokwi viel einfacher einzurichten und zu skalieren als mit physischer Hardware. Ich verwende intern bereits ein CI-Setup, um kritische Komponenten wie den ESP32-Wi-Fi bei Code-Updates und neuen ESP-IDF-Releases nicht zu zerstören, und arbeite jetzt an einer CLI (Befehlszeilenschnittstelle) für Wokwi, um die Verwendung des Simulators innerhalb von GitHub-Aktionen zu erleichtern.

Elektor: Sie scheinen sowohl Künstler als auch Ingenieur zu sein, wie viele beim Lesen Ihres Beitrags „A Practical Guide to Designing PCB Art" [11] feststellen können. Erzählen Sie uns von Ihrer kreativen Herangehensweise an Kunst und Elektronik.
Uri Shaked: Ich saß mit Freunden zusammen und plante ein intelligentes Namensschild für eine Konferenz. Nachdem wir über Hardware-Erweiterungen für das Namensschild diskutiert hatten, meinte jemand, es wäre auch cool, wenn die Teilnehmer kleine Spiele für das Namensschild schreiben könnten und eine Art App-Store hätten, um ihre Kreationen zu teilen. Da kam mir die Idee, dass wir keinen Online-App-Store benötigen, sondern stattdessen ein Hardware-Add-on mit einem kleinen EEPROM-Chip entwickeln. Die Anwesenden schreiben ihre Apps und Spiele auf das Add-on und geben es dann an ihre Freunde weiter, damit diese den Code auf ihr Namensschild kopieren. So wurde das Add-on *Floppy Disk* [12] geboren. Nachdem ich die Idee hatte, musste ich nur noch die Abmessungen einer Diskette nachschlagen, eine Skizze mit Inkscape zeichnen und entscheiden, welche Leiterplattenschicht ich für die einzelnen Elemente verwenden wollte: Siebdruck für den Aufkleber, lötzinnbeschichtetes Kupfer (HASL) für den Metallverschluss und Kupfer mit Lötmaske für das HD-Symbol. Ich habe den Schaltplan und das Layout in KiCad erstellt, und das Ergebnis - nun ja, Sie können es in **Bild 10** sehen.

Elektor: Haben Sie noch andere wichtige Projekte in der Pipeline?
Uri Shaked: Tiny Tapeout. Ich arbeite zusammen mit Matt Venn daran, und unser Ziel ist es, maßge-

schneiderte Chips erschwinglicher und zugänglicher zu machen. Sie können mit Verilog ein digitales Design zu erstellen oder mit Wokwi einzelne Logikgatter zusammensetzen, dann Ihr Design mit OpenLane (einem Open-Source-Workflow für digitales Design) „verfestigen“ und uns das Ergebnis schicken, damit wir es in unseren Chip aufnehmen. Zusammen mit Hunderten von anderen Entwürfen kombinieren wir alles zu einem Entwurf für einen einzelnen Chip, stellen diesen her, montieren ihn auf einer Platine und liefern Ihnen eine physische Version dessen, was sie entworfen haben. Die Platine in **Bild 11** verfügt über eine Reihe von DIP-Schaltern zur Auswahl eines Entwurfs, und zwar nicht nur ihren, so dass Sie auch mit den anderen Designs auf dem Chip herumspielen können. Das ist sogar erwünscht, denn alle Entwürfe sind Open Source, und wir stellen ein Datenblatt mit der gesamten Dokumentation zusammen. Wir arbeiten jetzt mit Universitäten zusammen, um deren Studenten Tiny Tapeout näher zu bringen, und erstellen Lehrmaterial, um Makern und Hardware-Enthusiasten zu helfen, etwas über Halbleiter und digitales Design zu lernen. Anfang dieses Jahres haben wir *Siliwiz* veröffentlicht, eine Open-Source-Anwendung mit einem visuellen Layout-Editor, einer DRC-Engine und einem SPICE-Simulator, die im Browser läuft. Es gibt noch viel mehr über Tiny Tapeout, die Community und die kreativen Designs unserer Nutzer zu erzählen, aber das ist eine Geschichte für ein anderes Mal!

RG -- 230366-02



Bild 11. Breakout-Platine für Tiny Tapeout (vorläufige Darstellung).



Über Uri Shaked

Uri Shaked ist seit vielen Jahren ein Maker. Derzeit arbeitet er an Wokwi, einer Online-Simulationsplattform für IoT und eingebettete Systeme, und an Tiny Tapeout [13], das die Herstellung kundenspezifischer ASICs erschwinglich und zugänglich macht. Seine Projekte und sein Blog sind unter [14] zu finden, mit vielen technischen Vorträgen und Videointerviews [15].



Über den Autor

Roberto Armani ist ein Elektronikingenieur mit mehr als fünfunddreißig Jahren Erfahrung in einer Vielzahl verschiedener Bereiche. Bevor er dem Elektor-Team als leitender Redakteur beitrat, sammelte er Erfahrungen und Kenntnisse in der Computerindustrie, der elektronischen Bildverarbeitung, der Telekommunikation, der Materialprüfung und dem Web-Publishing. Neben der Elektronik hört (und singt) er gerne klassische Musik und unternimmt Höhenwanderungen in den Bergen.

WEBLINKS

[1] Arduino-Projekt Hard-Drive Xylophon: https://youtu.be/dw9U0WxtK9c
[2] Experimente mit einer robotisierten Trompete: https://bit.ly/3N2FfCz
[3] Trompetendemo auf dem Chrome-Dev-Summit: https://youtu.be/PEVAczB9uUQ
[4] Elektronik mit einer persönlichen Note: https://blog.wokwi.com/wokwi-electronics-with-a-personal-touch/
[5] Real-Life-Version des „Offline-Dinosaurier-Spiels“ von Google Chrome: https://bit.ly/3qgsifz
[6] CLI-Probleme mit Arduino: https://github.com/arduino/arduino-cli/issues/2135
[7] Projekt Tanzende Servos: https://wokwi.com/projects/305336312628511297
[8] Benutzerdefinierte Chips-API: https://docs.wokwi.com/chips-api/getting-started
[9] Video „Umkehrung des ESP32 Wi-Fi“: https://youtu.be/XmaT8bMssyQ
[10] Wowki's Feature Voting Seite: https://wokwi.com/features
[11] Ein praktischer Leitfaden für das Design von PCB-Kunst: https://blog.wokwi.com/a-practical-guide-to-designing-pcb-art/
[12] Floppy-Disk-Add-On: https://github.com/urish/floppy-disk-sao
[13] Tiny Tapeout: https://tinytapeout.com
[14] Uris Projekt-Webseite: https://urish.org/#projects
[15] Uris Videos und Interviews: https://urish.org/#talks

Mitmachen beim STM32 Wireless Innovation CONTEST

Sei innovativ und gewinne!

Preise im Gesamtwert von €5.000 €

Beim STM32 Wireless Innovation Contest können Sie Ihre Kreativität und Ihre Fähigkeiten als Entwickler unter Beweis zu stellen, indem Sie spannende Funk-Anwendungen mit den leistungsstarken Entwicklungs- und Evaluierungsboards von STMicroelectronics entwickeln.

Erster Preis
2.500 €

Zweiter Preis
1.500 €

Dritter Preis
1.000 €

Teilnahme

1. Öffnen Sie www.elektormagazine.com/st-contest.
2. Wählen Sie eines der vorgeschlagenen Boards aus.
3. Entwickeln und dokumentieren Sie ein innovatives Projekt.
4. Laden Sie Ihr Projekt hoch.

Einsendeschluss: 19. Februar 2024

Die Boards

NUCLEO-WBA52CG

Das Ultra-Low-Power-Board NUCLEO-WBA52CG verfügt über Bluetooth® Low Energy nach der Spezifikation der Bluetooth® Low Energy SIG in der Version 5.3. Die Anschluss-Unterstützung von zu ARDUINO® Uno V3 und die ST-Morpho-Header ermöglichen die Funktionserweiterung der STM32-Nucleo-Open-Development-Plattform mit einer großen Palette spezieller Shields.



Eigenschaften

- Ultra-Low-Power Mikrocontroller STM32WBA52CG basierend auf einem Arm® Cortex®-M33-Kern mit 1 MB Flash-Speicher und 128 KB SRAM im UFQFPN48-Gehäuse
- MCU-HF-Board (MB1863) mit:
  - 2,4-GHz-Transceiver mit Bluetooth® nach SIG v5.3
  - Arm® Cortex® M33 CPU mit TrustZone®, MPU, DSP und FPU
  - Integrierte Platinen-Antenne
- Drei frei verwendbare LEDs
- Drei frei verwendbare und ein Reset-Taster
- Board-Anschlüsse:
  - Micro-USB-B
  - ARDUINO® Uno V3 Erweiterungs-Header
  - ST-Morpho-Header mit vollem Zugang zu allen STM32-I/O-Pins
- Flexible Stromversorgung: ST-LINK USB-VBUS oder externe Versorgung
- Integrierter STLINK-V3MODS-Debugger/Programmer mit USB-Re-Enumeration für Massenspeicher, virtuellen COM-Port und Debug-Port
- Umfangreiche freie Software-Libraries und Beispiele mit STM32CubeWB-MCU-Package
- Unterstützung vieler IDEs inklusive IAR Embedded Workbench®, MDK-ARM und STM32CubeIDE

STM32WB5MM-DK

Beim STM32 handelt es sich um ein Multi-Protokoll-Funk-Modul in Ultra-Low-Power-Technologie mit Bluetooth® Low Energy (BLE) nach der SIG-Spezifikation v5.2 und IEEE 802.15.4-2011.

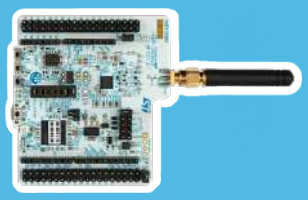


Eigenschaften

- STM32WB5MMG mit 1 MB Flash Speicher, 256 KB SRAM und HF-Modul
  - Dual-Core 32 bit Arm® Cortex®-M4 und dezidierte M0+ CPU für Echtzeit-Funk
  - 2,4-GHz-Transceiver mit Bluetooth® nach SIG V5.2, 802.15.4, Zigbee®, Thread® und proprietäre Protokolle
- 0,96" OLED-Display mit 128x64 Pixel
- 128-MB-Quad-SPI-NOR-Flash-Speicher
- Temperatursensor
- Accelerometer/Gyroskop
- Time-of-Flight und Gestenerkennung
- Digitale Mikrofon
- RGB-LED
- IR-LED
- Zwei User- und ein Reset-Taster sowie ein Touch-Button
- Board-Anschlüsse:
  - STMod+
  - ARDUINO® Uno V3 Erweiterungs-Header
  - Micro-USB-B
  - TAG10, 10-polig
- Flexible Stromversorgung: ST-LINK/V2-1 USB-Anschluss und 5 V via ARDUINO® oder externem Anschluss via USB-Netzteil etc.
- Integrierter ST-LINK/V2.1-Debugger/Programmer mit USB-Re-Enumeration für virtuellen COM-Port und Debug-Port
- Umfangreiche freie Software-Libraries und Beispiele mit STM32CubeWB-MCU-Package
- Unterstützung vieler IDEs inklusive IAR Embedded Workbench®, MDK-ARM und STM32CubeIDE

NUCLEO-WL55JC

Das Board NUCLEO-WL55JC STM32WL Nucleo-64 ist eine preiswerte und flexible Basis zum Ausprobieren neuer Konzepte und für Prototypen mit Mikrocontrollern der STM32WL-Serie. Es bietet eine besondere Kombination von Leistung, geringer Stromaufnahme und von Features.



Eigenschaften

- Multi-Protokoll-LP-WAN-Modul STM32WL55JC mit Dual-Core 32 bit Arm® Cortex®-M4/M0+ MCU mit 48 MHz Takt im UFBGA7-Gehäuse:
  - Ultra-Low-Power-MCU
  - HF-Transceiver (Frequenzbereich 150 bis 960 MHz) mit Unterstützung für LoRa®, (G)FSK, (G)MSK, und BPSK-Modulation
  - 256-KB-Flash-Speicher und 64 KB SRAM
- Drei frei verwendbare LEDs
- Drei frei verwendbare und ein Reset-Taster
- Quarz-Oszillator mit 32,768 kHz (LSE)
- Quarz-Oszillator mit 32 MHz (HSE)
- Board-Anschlüsse:
  - Micro-USB-B
  - MIPI® Debug-Port
  - ARDUINO® Uno V3 Erweiterungs-Header
  - ST-Morpho-Header mit vollem Zugang zu allen STM32WL-I/O-Pins
  - SMA-Antenne
- Flexible Stromversorgung: ST-LINK, USB-VBUS oder externe Versorgung
- Integrierter STLINK-V3-Debugger/Programmer mit USB-Re-Enumeration für Massenspeicher, virtuellen COM-Port und Debug-Port
- Umfangreiche freie Software-Libraries und Beispiele mit STM32CubeWB-MCU-Package
- Unterstützung vieler IDEs inklusive IAR Embedded Workbench®, MDK-ARM und STM32CubeIDE
- Geeignet für Rapid-Prototyping für Lösungen basierend auf LoRaWAN®, Sigfox™, wM-Bus und viele andere proprietäre Protokolle
- Open-Hardware-Plattform

www.elektormagazine.com/st-contest

Eine Anleitung zur Bare-Metal-Programmierung

Teil 3: CMSIS-Header, automatische Tests und ein Webserver

Von Sergey Lyubka (Irland)

In den ersten beiden Teilen dieser Artikelreihe haben wir gelernt, wie man Zugriff auf Controller-Pins, den Systemtakt und den UART erhält und unsere ersten Firmware-Beispiele mit Linker-Skripten und Makefiles durchgeführt. In diesem letzten Teil werden uns vordefinierte Header und Bibliotheken das Leben sehr erleichtern. Wir werden einen Webserver programmieren und sehen, wie Builds und Tests einer solchen komplexeren Firmware automatisiert werden können.

Anmerkung der Redaktion: Dieser Leitfaden ist ein „lebendes" Dokument auf GitHub [1].

CMSIS-Header des Herstellers

In den vorherigen Artikeln [2][3] haben wir die Firmware nur mit Hilfe von Datenblättern, einem Editor und einem GCC-Compiler entwickelt. Wir haben die Definitionen der Peripheriestrukturen manuell mit Hilfe von Datenblättern erstellt.
Nun, da Sie wissen, wie das alles funktioniert, ist es an der Zeit, CMSIS-Header einzuführen. Dies sind Header-Dateien mit allen Definitionen, die vom Hersteller der MCU erstellt und bereitgestellt werden. Sie enthalten Definitionen für die internen Blöcke und Peripheriebausteine der jeweiligen MCU und sind daher recht umfangreich.
CMSIS steht für *Common Microcontroller Software Interface Standard* und ist eine gemeinsame Grundlage für MCU-Hersteller, um Peripherie-APIs zu spezifizieren. Da CMSIS ein ARM-Standard ist und die CMSIS-Header vom MCU-Hersteller zur Verfügung gestellt werden, genießt er den Rang einer Definition. Daher ist die Verwendung von Headern der Hersteller der manuellen Erstellung von Definitionen stets vorzuziehen.
Es gibt zwei Arten von CMSIS-Headern:

- ARM Core CMSIS-Header. Sie beschreiben den ARM-Kern und werden von ARM auf GitHub [4] veröffentlicht.
- CMSIS-Header der MCU-Hersteller. Sie beschreiben MCU-Peripherieeinheiten und werden vom MCU-Hersteller veröffentlicht. In unserem Fall veröffentlicht ST sie unter [5].

Wir können diese Header mit einem einfachen Makefile-Snippet abrufen:

(siehe *https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/blob/main/steps/step-5-cmsis/Makefile*)

```
cmsis_core:
    git clone --depth 1 -b 5.9.0
      https://github.com/ARM-software/CMSIS_5 $@
cmsis_f4:
    git clone --depth 1 -b v2.6.8
      https://github.com/STMicroelectronics/
      cmsis_device_f4 $@
```

Das CMSIS-Paket von ST enthält auch Startdateien für alle MCUs dieses Herstellers. Wir können diese verwenden, anstatt die *startup.c* von Hand zu schreiben. Die von ST bereitgestellte Startup-Datei ruft die Funktion `SystemInit()` auf, also definieren wir sie in *main.c*.
Ersetzen wir nun unsere API-Funktionen in *hal.h* durch CMSIS-Definitionen und lassen wir den Rest der Firmware intakt. Entfernen Sie alle Peripherie-APIs und Definitionen aus *hal.h* und lassen Sie nur die Standard-C-Includes, das CMSIS-Include des Herstellers, die Defines für PIN, BIT, FREQ und die Hilfsfunktion `timer_expired()` übrig.
Wenn wir versuchen, die Firmware neu zu erstellen - `make clean build`, dann wird der GCC sich über fehlende `systick_init()`, `GPIO_MODE_OUTPUT`, `uart_init()` und `UART3` beschweren (und der Vorgang fehlschlagen). Fügen wir diese mit Hilfe der STM32-CMSIS-Dateien hinzu.
Beginnen wir mit `systick_init()`. Die CMSIS-Header des ARM-Kerns bieten eine `SysTick_Config()`-Funktion mit identischer Aufgabe, also verwenden wir diese.
Als nächstes kommt die Funktion `gpio_set_mode()`. Der *stm32f429xx.h*-Header hat eine `GPIO_TypeDef`-Struktur, die mit unserer `struct gpio` identisch ist. Benutzen wir sie:

(siehe *https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/blob/main/steps/step-5-cmsis/hal.h*)

```
#define GPIO(bank) ((GPIO_TypeDef *)
    (GPIOA_BASE + 0x400U * (bank)))
enum { GPIO_MODE_INPUT, GPIO_MODE_OUTPUT,
       GPIO_MODE_AF, GPIO_MODE_ANALOG };

static inline void gpio_set_mode
              (uint16_t pin, uint8_t mode) {
  GPIO_TypeDef *gpio =
     GPIO(PINBANK(pin));  // GPIO bank
```

Die Funktionen `gpio_set_af()` und `gpio_write()` sind ebenfalls trivial - ersetzen Sie einfach `struct gpio` durch `GPIO_TypeDef`, und das war's.
Als nächstes kommt UART an die Reihe. Es gibt eine `USART_TypeDef` und Definitionen für USART1, USART2 und USART3. Benutzen wir sie:

```
#define UART1 USART1
#define UART2 USART2
#define UART3 USART3
```

In `uart_init()` und den übrigen UART-Funktionen ändern Sie `struct uart` in `USART_TypeDef`. Der Rest bleibt gleich!
Und schon sind wir fertig. Rebuilden Sie die Firmware und flashen Sie sie erneut. Die LED blinkt, der UART zeigt die Ausgabe an. Herzlichen Glückwunsch, wir haben unseren Firmware-Code so angepasst, dass er die Header-Dateien der Vendor-CMSIS verwendet.
Jetzt sollten wir das Repository ein wenig umorganisieren, indem wir alle Standarddateien in das *include*-Verzeichnis verschieben und das Makefile aktualisieren, damit GCC davon Kenntnis erhält:

(siehe *https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/blob/main/steps/step-5-cmsis/Makefile*)

```
-I. -Iinclude -Icmsis_core/CMSIS/Core/Include -Icmsis_
f4/Include \
```

Außerdem sollten wir die CMSIS-Header als Abhängigkeit für die Binary einschließen:

```
firmware.elf: cmsis_core cmsis_f4 mcu.h
              link.ld Makefile $(SOURCES)
```

Damit haben wir nun eine Projektvorlage auch für zukünftige Projekte. Den vollständigen Quellcode des Projekts finden Sie im Projektordner *step-5-cmsis* [6].

Einstellen der Takte

Nach dem Booten läuft die Nucleo-F429ZI CPU mit 16 MHz. Die maximale Frequenz beträgt aber 180 MHz. Beachten Sie, dass die Systemtaktfrequenz nicht der einzige Faktor ist, auf den wir achten müssen. Die Peripheriebausteine sind an verschiedene Busse angeschlossen, APB1 und APB2, die unterschiedlich getaktet sind. Ihre Taktgeschwindigkeiten werden durch die Frequenz-Voreinstellungen konfiguriert, die im RCC eingestellt werden (der RCC-Controller verwaltet die Taktfrequenzen für System und Peripherie). Auch die Haupttaktquelle der CPU kann unterschiedlich ausgebildet sein - es kann entweder ein externer Quarzoszillator (HSE) oder ein interner Oszillator (HSI) sein. In unserem Fall wollen wir HSI verwenden.
Wenn die CPU Anweisungen aus dem Flash ausführt, wird die Flash-Lesegeschwindigkeit (die bei etwa 25 MHz liegt) zu einem Engpass, wenn der CPU-Takt höher wird. Es gibt mehrere Tricks, dieses Problem zu umschiffen. Einer davon ist der Befehls-Prefetch. Außerdem können wir dem Flash-Controller einen Hinweis darauf geben, wie schnell der Systemtakt ist: Dieser Wert wird als Flash-Latenzzeit bezeichnet. Bei einem Systemtakt von 180 MHz beträgt der Wert für `FLASH_LATENCY` 5. Bit 8 und Bit 9 im Flash-Controller aktivieren Befehls- und Daten-Caches:

```
FLASH->ACR |= FLASH_LATENCY | BIT(8) |
          BIT(9); // Flash latency, caches
```

Die Taktquelle (HSI oder HSE) durchläuft eine Hardwarekomponente namens PLL, die die Ursprungsfrequenz mit einem bestimmten Wert multipliziert. Dann wird eine Reihe von Frequenzteilern verwendet, um den Systemtakt sowie die APB1- und APB2-Takte einzustellen. Um den maximalen Systemtakt von 180 MHz zu erreichen, sind mehrere Werte von PLL-Teilern und APB-Prescalern möglich. In Abschnitt 6.3.3 im Referenzhandbuch des STM32F4xx-Controllers [7] finden wir die Höchstwerte für den APB1-Takt: ≤ 45 MHz und den APB2-Takt: ≤ 90 MHz. Das beschränkt die Liste der möglichen Kombinationen. Hier haben wir die Werte manuell ausgewählt. Beachten Sie, dass Tools wie *CubeMX* den Prozess automatisieren können und ihn einfach und anschaulich machen.

(siehe *https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/blob/main/steps/step-6-clock/hal.h*)

```
 // 6.3.3: APB1 clock <= 45MHz;
 //             APB2 clock <= 90MHz
 // 3.5.1, Table 11: configure flash
// latency (WS) in accordance to clock freq
 // 33.4: The AHB clock must be at least
 // 25 MHz when Ethernet is used
 enum { APB1_PRE = 5 /* AHB clock / 4 */,
        APB2_PRE = 4 /* AHB clock / 2 */ };
 enum { PLL_HSI = 16, PLL_M = 8,
        PLL_N = 180, PLL_P = 2 };
               // Run at 180 Mhz
 #define FLASH_LATENCY 5
 #define SYS_FREQUENCY ((PLL_HSI * PLL_N /
                   PLL_M / PLL_P) * 1000000)
 #define APB2_FREQUENCY
         (SYS_FREQUENCY / (BIT(APB2_PRE - 3)))
 #define APB1_FREQUENCY
         (SYS_FREQUENCY / (BIT(APB1_PRE - 3)))
```

Listing 1. Clock-Initialisierung.

(siehe https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/blob/main/steps/step-6-clock/sysinit.c)

```
uint32_t SystemCoreClock = SYS_FREQUENCY;

void SystemInit(void) {  // Called automatically by startup code
  SCB->CPACR |= ((3UL << 10 * 2) | (3UL << 11 * 2));  // Enable FPU
  FLASH->ACR |= FLASH_LATENCY | BIT(8) | BIT(9);      // Flash latency, prefetch
  RCC->PLLCFGR &= ~((BIT(17) - 1));                   // Clear PLL multipliers
  RCC->PLLCFGR |= (((PLL_P - 2) / 2) & 3) << 16;      // Set PLL_P
  RCC->PLLCFGR |= PLL_M | (PLL_N << 6);               // Set PLL_M and PLL_N
  RCC->CR |= BIT(24);                                 // Enable PLL
  while ((RCC->CR & BIT(25)) == 0) spin(1);           // Wait until done
  RCC->CFGR = (APB1_PRE << 10) | (APB2_PRE << 13);    // Set prescalers
  RCC->CFGR |= 2;                                     // Set clock source to PLL
  while ((RCC->CFGR & 12) == 0) spin(1);              // Wait until done

  RCC->APB2ENR |= RCC_APB2ENR_SYSCFGEN;    // Enable SYSCFG
  SysTick_Config(SystemCoreClock / 1000);  // Sys tick every 1ms
}
```

Jetzt sind wir bereit für einen einfachen Algorithmus, um den Takt für CPU und Peripheriebusse einzustellen. Er könnte wie folgt aussehen:

- Optional: FPU einschalten
- Flash-Latenzzeit einstellen
- Entscheiden Sie sich für eine Taktquelle und für die Vorteiler für PLL, APB1 und APB2
- Konfigurieren Sie RCC durch Einstellen der entsprechenden Werte
- Verschieben der Taktinitialisierung in eine separate Datei namens *sysinit.c* mit der Funktion `SystemInit()`, die automatisch vom Startup-Code aufgerufen wird

Siehe **Listing 1**! Wir müssen auch *hal.h* ändern - insbesondere den UART-Initialisierungscode. Die verschiedenen UART-Controller laufen auf unterschiedlichen Bussen: UART1 auf dem schnellen APB2 und die übrigen UARTs auf einem langsameren APB1. Bei einem Standardtakt von 16 MHz spielt das keine Rolle, doch bei höheren Geschwindigkeiten können APB1 und APB2 unterschiedliche Takte haben, so dass wir die Berechnung der Baudrate für den UART anpassen müssen (**Listing 2**).
Nach dem Rebuild und dem erneuten Flashen läuft unser Board mit der maximalen Geschwindigkeit von 180 MHz! Den vollständigen Quellcode des Projekts finden Sie im Projektordner *step-6-clock* [8].

Webserver mit Device-Dashboard

Der Nucleo-F429ZI ist von Haus aus mit Ethernet ausgestattet. Ethernet-Hardware benötigt zwei Komponenten: einen PHY (der elektrische Signale an das Medium, sei es Kupfer oder ein optisches Kabel, sendet/empfängt) und einen MAC (der den PHY-Controller steuert). Auf unserem Nucleo-Board ist der MAC-Controller integriert, und der PHY ist extern (genauer gesagt ist es der LAN8720a von Microchip).

MAC und PHY können über verschiedene Schnittstellen kommunizieren. Wir werden RMII verwenden. Dazu muss eine Reihe von Pins so konfiguriert werden, dass sie ihre alternative Funktion (AF) verwenden. Um einen Webserver zu implementieren, benötigen wir drei Softwarekomponenten:

- einen Netzwerktreiber, der Ethernet-Frames zum/vom MAC-Controller sendet/empfängt
- einen Netzwerk-Stack, der Frames parst und TCP/IP versteht
- eine Netzwerkbibliothek, die HTTP versteht

Wir werden die Netzwerkbibliothek *Mongoose* [9] verwenden, die all dies in einer einzigen Datei implementiert. Mongoose ist doppelt lizenziert (GPLv2/kommerziell) und ermöglicht eine schnelle und einfache Entwicklung von eingebetteten Netzwerken.
Kopieren Sie also *mongoose.c* [10] und *mongoose.h* [11] in unser Projekt. Jetzt haben wir einen Treiber, einen Netzwerk-Stack und eine Bibliothek zur Hand. Mongoose bietet auch viele Beispiele, darunter eines für ein Device-Dashboard [12]. Es enthält viele Dinge wie ein Dashboard-Login, Echtzeit-Datenaustausch über WebSocket, ein eingebettetes Dateisystem, MQTT-Kommunikation und mehr. Lassen Sie uns also dieses schöne Beispiel verwenden. Kopieren Sie zwei zusätzliche Dateien:

- *net.c* [13] - implementiert Dashboard-Funktionalität
- *packed_fs.c* [14] - enthält HTML/CSS/JS GUI-Dateien

Wir müssen Mongoose mitteilen, welche Funktionen aktiviert werden sollen. Das kann über Kompilierungsflags geschehen, die in Präprozessorkonstanten gesetzt werden. Alternativ können die gleichen Konstanten auch in der Datei *mongoose_custom.h* gesetzt werden. Lassen Sie uns der Übersichtlichkeit wegen den zweiten Weg gehen. Erstellen Sie eine Datei *mongoose_custom.h* mit folgendem Inhalt:

Listing 2. UART-Initialisierung.

(siehe https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/blob/main/steps/step-6-clock/hal.h)

```
static inline bool uart_init(USART_TypeDef *uart, unsigned long baud) {

  // https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f429zi.pdf
  uint8_t af = 7;           // Alternate function
  uint16_t rx = 0, tx = 0;  // pins
  uint32_t freq = 0;        // Bus frequency. UART1 is on APB2, rest on APB1

  if (uart == USART1) {
    freq = APB2_FREQUENCY, RCC->APB2ENR |= BIT(4);
    tx = PIN('A', 9), rx = PIN('A', 10);
  } else if (uart == USART2) {
    freq = APB1_FREQUENCY, RCC->APB1ENR |= BIT(17);
    tx = PIN('A', 2), rx = PIN('A', 3);
  } else if (uart == USART3) {
    freq = APB1_FREQUENCY, RCC->APB1ENR |= BIT(18);
    tx = PIN('D', 8), rx = PIN('D', 9);
  } else {
    return false;
  }
```

Listing 3. Ethernet initialisieren, MAC GPIO-Pins aktivieren.

(siehe https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/blob/main/steps/step-7-webserver/nucleo-f429zi/main.c)

```
uint16_t pins[] = ;
  for (size_t i = 0; i < sizeof(pins) / sizeof(pins[0]); i++) {
    gpio_init(pins[i], GPIO_MODE_AF, GPIO_OTYPE_PUSH_PULL, GPIO_SPEED_INSANE,
              GPIO_PULL_NONE, 11);
  }
  nvic_enable_irq(61);                          // Setup Ethernet IRQ handler
  RCC->APB2ENR |= BIT(14);                      // Enable SYSCFG
  SYSCFG->PMC |= BIT(23);                       // Use RMII. Goes first!
  RCC->AHB1ENR |= BIT(25) | BIT(26) | BIT(27);  // Enable Ethernet clocks
  RCC->AHB1RSTR |= BIT(25);                     // ETHMAC force reset
  RCC->AHB1RSTR &= ~BIT(25);                    // ETHMAC release reset
```

```
#pragma once
#define MG_ARCH MG_ARCH_NEWLIB
#define MG_ENABLE_MIP 1
#define MG_ENABLE_PACKED_FS 1
#define MG_IO_SIZE 512
#define MG_ENABLE_CUSTOM_MILLIS 1
```

Nun ist es an der Zeit, der Datei *main.c* etwas Netzwerkcode hinzuzufügen. Wir `#include "mongoose.c"`, initialisieren die Ethernet RMII-Pins und aktivieren Ethernet im RCC, siehe **Listing 3**.
Der Mongoose-Treiber verwendet Ethernet-Interrupts, daher müssen wir *startup.c* aktualisieren und *ETH_IRQHandler* zur Vektortabelle hinzufügen. Lassen Sie uns die Definition der Vektortabelle in *startup.c* so umgestalten, dass keine Änderungen erforderlich sind, um eine Interrupt-Handler-Funktion hinzuzufügen. Die Idee ist, ein „weak symbol"-Konzept zu verwenden.

Eine Funktion kann als „weak" gekennzeichnet werden und funktioniert wie eine normale Funktion mit dem Unterschied, dass der Quellcode eine Funktion mit demselben Namen auch an anderer Stelle definiert. Normalerweise führen zwei Funktionen mit demselben Namen dazu, dass ein Build fehlschlägt. Wenn jedoch eine Funktion als „weak" gekennzeichnet ist, gelingt der Build und der Linker wählt eine nicht-schwache Funktion aus. Dies gibt die Möglichkeit, eine „Default"-Funktion in einer Vorlage bereitzustellen, mit der Möglichkeit, sie zu überschreiben, indem einfach eine Funktion mit dem gleichen Namen an anderer Stelle im Code erstellt wird.
So funktioniert es auch in unserem Fall. Wir wollen eine Vektortabelle mit Standard-Handlern füllen, aber dem Benutzer die Möglichkeit geben, jeden Handler zu überschreiben. Zu diesem Zweck erstellen wir eine Funktion `DefaultIRQHandler()` und kennzeichnen sie als `weak`. Dann deklarieren wir für jeden

Listing 4. Initialisierung der Mongoose-Bibliothek.

```
struct mg_mgr mgr;        // Initialise Mongoose event manager
mg_mgr_init(&mgr);        // and attach it to the MIP interface
mg_log_set(MG_LL_DEBUG);  // Set log level
struct mip_driver_stm32 driver_data = {.mdc_cr = 4};  // See driver_stm32.h
struct mip_if mif = {
     .mac {2, 0, 1, 2, 3, 5}
     .use_dhcp = true,
     .driver = &mip_driver_stm32,
     .driver_data = &driver_data,
};
mip_init(&mgr, &mif);
extern void device_dashboard_fn(struct mg_connection *, int, void *, void *);
mg_http_listen(&mgr, "http://0.0.0.0", device_dashboard_fn, &mgr);
MG_INFO(("Init done, starting main loop"));
```

Listing 5. Makefile mit Bibliotheksreferenzen.

```
847 3 mongoose.c:6784:arp_cache_add     ARP cache: added 0xc0a80001 @
90:5c:44:55:19:8b
 84e 2 mongoose.c:6817:onstatechange     READY, IP: 192.168.0.24
 854 2 mongoose.c:6818:onstatechange            GW: 192.168.0.1
 859 2 mongoose.c:6819:onstatechange            Lease: 86363 sec
 LED: 1, tick: 2262
 LED: 0, tick: 2512
```

IRQ-Handler einen Handler-Namen und machen ihn zu einem Alias auf `DefaultIRQHandler()`:

```
void __attribute__((weak)) DefaultIRQHandler(void) {
for (;;) (void) 0;
}
#define WEAK_ALIAS
    __attribute__((weak, alias("DefaultIRQHandler")))
WEAK_ALIAS void NMI_Handler(void);
WEAK_ALIAS void HardFault_Handler(void);
WEAK_ALIAS void MemManage_Handler(void);
...
__attribute__((section(".vectors")))
     void (*tab[16 + 91])(void) =
        { 0, _reset, NMI_Handler,
         HardFault_Handler, MemManage_Handler,
  ...
```

Jetzt können wir einen beliebigen IRQ-Handler in unserem Code definieren, der dann den Standard-Handler ersetzt. Genau das geschieht in unserem Fall: Es gibt eine `ETH_IRQHandler()`-Funktion, die vom STM32-Treiber von Mongoose definiert wurde und die den Standard-Handler ersetzt.
Der nächste Schritt besteht darin, die Mongoose-Bibliothek zu initialisieren: Erstellen Sie einen Event-Manager, richten Sie den Netzwerktreiber ein und starten Sie eine hörende HTTP-Verbindung (**Listing 4**). Jetzt muss nur noch ein `mg_mgr_poll()`-Aufruf in die Hauptschleife eingefügt werden.
Fügen Sie nun die Dateien *mongoose.c*, *net.c* und *packed_fs.c* in das Makefile ein. Führen Sie ein Rebuild durch und flashen Sie das Board erneut. Schließen Sie eine serielle Konsole an die Debug-Ausgabe an und beobachten Sie, dass das Board eine IP-Adresse über DHCP erhält. Siehe **Listing 5**.
Starten Sie einen Browser mit dieser IP-Adresse und erhalten Sie ein funktionierendes Dashboard mit Echtzeitgraphen über WebSocket, MQTT, Authentifizierung und anderen Dingen! In der vollständigen Beschreibung erfahren Sie weitere Details.
Den vollständigen Quellcode des Projekts finden Sie im Verzeichnis *step-7-webserver* [15].

Automatisierte Firmware-Builds (Software CI)

Es ist eine gute Praxis für ein Softwareprojekt, einen kontinuierlichen Integrationstest (CI) durchzuführen. Bei jeder Änderung, die in das Repository übertragen wird, werden alle Komponenten automatisch neu erstellt und getestet.
GitHub gestaltet das ganz einfach. Wir können eine Datei *.github/workflows/test.yml* für die *CI configuration* erstellen. In dieser Datei können wir ARM GCC installieren und `make` in jedem Beispielverzeichnis ausführen, um die entsprechenden Firmware-Dateien zu erstellen. Langer Rede kurzer Sinn, folgendes weist GitHub an, bei jedem Repo-Push zu starten:

(siehe *https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/blob/main/.github/workflows/test.yml*)

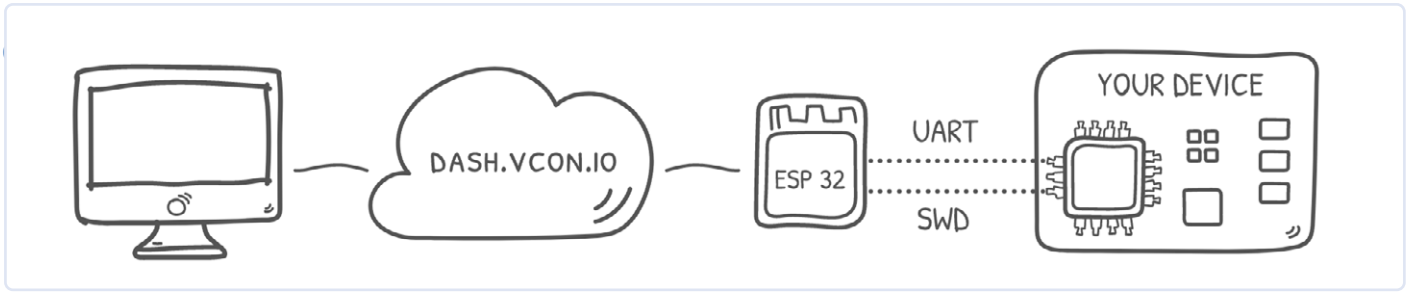


Bild 1. Einrichten des ESP32 als ferngesteuertes Programmiergerät und Registrierung auf vcon.io.

```
name: build
on: [push, pull_request]
```

Dies installiert den ARM-GCC-Compiler:

```
- run: sudo apt -y install
      gcc-arm-none-eabi make stlink-tools
```

Dadurch wird die Firmware in jedem Beispielverzeichnis erstellt:

```
- run: make -C step-0-minimal
- run: make -C step-1-blinky
- run: make -C step-2-systick
- run: make -C step-3-uart
- run: make -C step-4-printf
- run: make -C step-5-cmsis
- run: make -C step-6-clock
- run: make -C step-7-webserver/nucleo-f429zi
- run: make -C step-7-webserver/pico-w
```

Das war's schon! Extrem einfach und extrem leistungsstark. Wenn wir jetzt eine Änderung am Repo vornehmen, die einen Build beschädigt, werden wir von GitHub benachrichtigt. Im Erfolgsfall verhält sich GitHub still. Ein (erfolgreiches) Beispiel dafür zeigt der Lauf in [16].

Automatisierte Firmware-Tests (Hardware CI)

Wäre es nicht toll, die erstellten Firmware-Binärdateien auch auf echter Hardware zu testen, nicht nur, um den Erstellungsprozess zu prüfen, sondern auch, ob die erstellte Firmware korrekt und funktionsfähig ist?
Es ist nicht trivial, ein solches passendes Testsystem zu erstellen. Man kann zum Beispiel eine spezielle Test-Workstation einrichten, ein getestetes Gerät (zum Beispiel ein Nucleo-F429ZI-Board) daran anschließen, eine Software für den Fern-Upload der Firmware schreiben und mit einem eingebauten Debugger testen. Das ist möglich, aber anfällig, erfordert viel Aufwand und viel Aufmerksamkeit.
Die Alternative ist, eines der kommerziellen Hardware-Testsysteme einer *Embedded Board Farm* (EBF) zu verwenden, obwohl solche kommerziellen Lösungen recht teuer sind. Aber es gibt einen genau so einfachen und dennoch preiswerten Weg.

Die Lösung: ESP32 plus vcon.io

Mit Hilfe des Dienstes *http://vcon.io*, der eine Fernaktualisierung der Firmware und einen UART-Monitor implementiert, können wir:

- ein beliebiges ESP32- oder ESP32-C3-Gerät (zum Beispiel ein günstiges Entwicklungsboard) nehmen
- eine vorgefertigte Firmware darauf flashen und den ESP32 in ein ferngesteuertes Programmiergerät verwandeln
- den ESP32 mit dem Zielgerät verbinden: SWD-Pins zum Flashen, UART-Pins zur Erfassung der Ausgabe
- den ESP konfigurieren, um sich auf dem Management-Dashboard von *vcon.io* [17] zu registrieren

Danach verfügt Ihr Zielgerät über eine authentifizierte, sichere RESTful-API zum erneuten Flashen und Erfassen der Geräteausgabe. Sie kann von überall aus aufgerufen werden, zum Beispiel von der Software-KI (siehe **Bild 1**).
Hinweis: vcon.io wird von Cesanta betrieben - dem Unternehmen, für das ich arbeite. Es handelt sich um einen kostenpflichtigen Dienst mit einem Freikontingent: Wenn Sie nur ein paar Geräte zu verwalten haben, ist er völlig kostenlos.

Konfigurieren und Verdrahten des ESP32

Nehmen Sie einen beliebigen ESP32 oder ESP32-C3 - ein Entwicklungsboard, ein Modul oder Ihr eigenes Gerät. Ich empfehle das Entwicklungsboard ESP32-C3 XIAO wegen seines niedrigen Preises und seines kleinen Formfaktors.
Wir gehen davon aus, dass das Zielgerät ein Raspberry Pi W5500-EVB-Pico-Board [18] mit einer eingebauten Ethernet-Schnittstelle ist. Wenn Sie ein anderen Gerät verwenden, passen Sie das Wiring entsprechend seiner Pinbelegung an.

- Folgen Sie *Flashing ESP32* [19], um Ihren ESP32 zu flashen
- Folgen Sie *Network Setup* [20], um ESP32 auf dem Dashboard zu registrieren
- Folgen Sie *Wiring* [21], um ESP32 mit Ihrem Gerät zu verkabeln

Bild 2 zeigt, wie ein konfiguriertes Gerät auf dem Breadboard aussehen kann, und **Bild 3** zeigt, wie es auf dem Dashboard aussieht. Jetzt können Sie Ihr Gerät mit einem einzigen Befehl neu flashen:

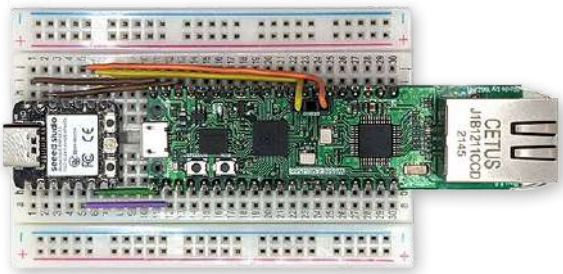


Bild 2. Konfiguriertes Gerät auf dem Breadboard.

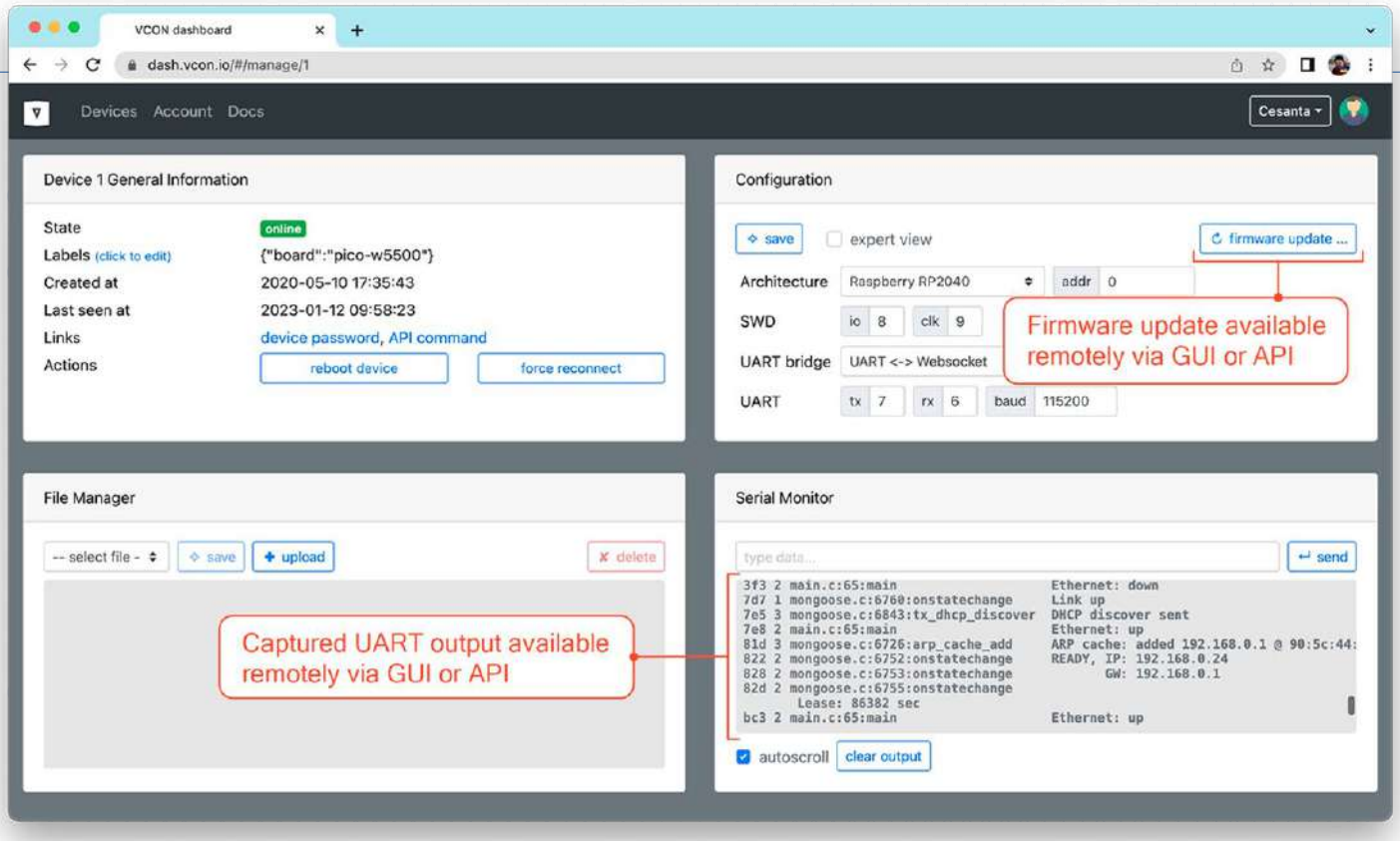


Bild 3. Konfiguriertes Device-Dashboard.

```
curl -su :API_KEY https://dash.vcon.io/api/v3/devices/ID/ota --data-binary @firmware.bin
```

Dabei ist `API_KEY` der Authentifizierungsschlüssel von *dash.vcon.io*, `ID` die registrierte Gerätenummer und `firmware.bin` der Name der neu erstellten Firmware. Sie erhalten den `API_KEY`, indem Sie auf einem Dashboard auf den Link *api key* klicken. Die Geräte-ID ist in der Tabelle aufgeführt. Wir können die Geräteausgabe auch mit einem einzigen Befehl erfassen:

```
curl -su :API_KEY https://dash.vcon.io/api/v3/devices/ID/tx?t=5
```

Dabei bedeutet t=5, dass fünf Sekunden gewartet wird, während die UART-Ausgabe erfasst wird.
Jetzt können wir diese beiden Befehle in jeder Software-CI-Plattform verwenden, um neue Firmware auf einem echten Gerät zu testen und die UART-Ausgabe des Geräts überprüfen.

Integration mit GitHub-Aktionen

Okay, unsere Software-CI erstellt ein Firmware-Image für uns, und jetzt können wir dieses Firmware-Image sogar auf einer echten Hardware testen! Wir sollten ein paar zusätzliche Befehle hinzufügen, die das Utility *curl* verwenden, um die erstellte Firmware an das Testboard zu senden und dann die Debug-Ausgabe zu erfassen. Der *curl*-Befehl erfordert einen geheimen API-Schlüssel, den wir nicht der Öffentlichkeit preisgeben wollen. Im Allgemeinen ist der richtige Weg der folgende:

- Gehen Sie zu den Projekteinstellungen Ihres Projekts auf GitHub (Sie könnten das Repository mit den Webserver-Beispielen klonen), dann auf */Secrets/Actions*
- Klicken Sie auf den Button *New repository secret*
- Geben Sie ihm einen Namen, `VCON_API_KEY`, fügen Sie den Wert in das Feld *Secret* ein und klicken Sie auf *Add secret*

Eines der Beispielprojekte [22] baut Firmware für das RP2040-W5500-Board, also flashen wir es mit einem *curl*-Befehl und dem gespeicherten API-Schlüssel. Der beste Weg ist, ein Makefile-Target zum Testen hinzuzufügen und es von *GitHub Actions* (unserem Software-CI) aufrufen zu lassen:

(siehe *https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/blob/main/.github/workflows/test.yml*)

```
- run: make -C step-7-webserver/pico-w5500 test VCON_API_KEY=${}
```

Die Umgebungsvariable `VCON_API_KEY` wird an `make` übergeben und Makefile-Ziel von `test` aufgerufen, das unsere Firmware bauen und testen soll. In **Listing 6** sehen Sie das Makefile-Ziel von `test`. Erläuterung:

- Zeile 34: Das `test`-Ziel hängt vom `upload`-Target ab, also wird zuerst `upload` ausgeführt (siehe Zeile 38)
- Zeile 35: Erfasst das UART-Protokoll für fünf Sekunden und speichert es in */tmp/output.txt*
- Zeile 36: Suche nach der Zeichenkette `Ethernet: up` in der Ausgabe und abbrechen, wenn sie nicht gefunden wird
- Zeile 38: Das `upload`-Ziel hängt vom `build` ab, daher wird die Firmware vor dem Testen immer erstellt
- Zeile 39: Wir flashen die Firmware „aus der Ferne“. Das Flag `--fail` bewirkt, dass das Programm *curl* fehlschlägt, wenn die Antwort des Servers nicht erfolgreich ist (nicht HTTP 200 OK ist)

Listing 6. Makefile für Webserver auf dem Pico.

(siehe https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/blob/main/steps/step-7-webserver/pico-w5500/Makefile)

```
32 # Requires env variable VCON_API_KEY set
33 DEVICE_URL ?= https://dash.vcon.io/api/v3/devices/1
34 test: update
35   curl --fail -su :$(VCON_API_KEY) $(DEVICE_URL)/tx?t=5 | tee /tmp/output.txt
36   grep 'Ethernet: up' /tmp/output.txt

38 update: build
39   curl --fail -su :$(VCON_API_KEY) $(DEVICE_URL)/ota --data-binary @firmware.bin
```

Listing 7. Ausgabe des Befehls Make Test.

```
$ make test
 curl --fail ...
 {"success":true,"written":59904}
 curl --fail ...
 3f3 2 main.c:65:main                    Ethernet: down
 7d7 1 mongoose.c:6760:onstatechange     Link up
 7e5 3 mongoose.c:6843:tx_dhcp_discover  DHCP discover sent
 7e8 2 main.c:65:main                    Ethernet: up
 81d 3 mongoose.c:6726:arp_cache_add     ARP cache: added 192.168.0.1 @
90:5c:44:55:19:8b
 822 2 mongoose.c:6752:onstatechange     READY, IP: 192.168.0.24
 827 2 mongoose.c:6753:onstatechange           GW: 192.168.0.1
 82d 2 mongoose.c:6755:onstatechange           Lease: 86336 sec
 bc3 2 main.c:65:main                    Ethernet: up
 fab 2 main.c:65:main                    Ethernet: up
```

In **Listing 7** finden Sie die Beispielausgabe des oben beschriebenen Befehls `make test`.

Geschafft! Jetzt stellen unsere automatischen Tests sicher, dass die Firmware erstellt werden kann, dass sie bootfähig ist und dass sie den Netzwerkstack korrekt initialisiert. Dieser Mechanismus kann leicht erweitert werden: Fügen Sie einfach komplexere Aktionen in Ihre Firmware-Binärdatei ein, geben Sie das Ergebnis auf dem UART aus, und überprüfen Sie die erwartete Ausgabe im Test.

Viel Spaß beim Testen! RG– 220665-C-02

Über den Autor

Sergey Lyubka ist Ingenieur und Unternehmer. Er hat einen MSc in Physik von der Staatlichen Universität Kyijw, Ukraine. Sergey ist Direktor und Mitbegründer von Cesanta, einem Technologieunternehmen mit Sitz in Dublin, Irland (Embedded Web Server für elektronische Geräte: https://mongoose.ws). Seine Leidenschaft gilt der Bare-Metal-Programmierung eingebetteter Netzwerke.

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Schicken Sie eine E-Mail an den Autor unter sergey.lyubka@cesanta.com oder kontaktieren Sie Elektor unter redaktion@elektor.de.

Passende Produkte

- **Dogan Ibrahim, Nucleo Boards Programming with the STM32CubeIDE (Elektor 2020)**
  Buch, Paperback, englisch: www.elektor.de/19530
  E-Buch, PDF, englisch: www.elektor.com/19531

- **Dogan Ibrahim, Programming with STM32 Nucleo Boards (Elektor 2015)**
  E-Buch, PDF, englisch: https://www.elektor.de/programming-with-stm32-nucleo-boards-e-book

WEBLINKS

[1] Diese Anleitung auf GitHub: https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide
[2] Sergey Lyubka, „Anleitung zur Bare-Metal-Programmierung, Teil 1“, Elektor 7-8/2023: https://elektormagazine.de/220665-02
[3] Sergey Lyubka, „Anleitung zur Bare-Metal-Programmierung, Teil 2“, Elektor 9-10/2023: https://elektormagazine.de/220665-B-02
[4] CMSIS, Version 5: https://github.com/ARM-software/CMSIS_5
[5] STM32 CMSIS-Header für die F4-Familie: https://github.com/STMicroelectronics/cmsis_device_f4
[6] Step-5-CMSIS-Ordner: https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/tree/main/steps/step-5-cmsis
[7] Referenzhandbuch RM0090 für STM32F4xx Controller (PDF): https://tinyurl.com/stm32f4man
[8] Step-6-CMSIS-Ordner: https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/tree/main/steps/step-6-clock
[9] Netzwerkbibliothek Mongoose: https://github.com/cesanta/mongoose
[10] mongoose.c: https://raw.githubusercontent.com/cesanta/mongoose/master/mongoose.c
[11] mongoose.h: https://raw.githubusercontent.com/cesanta/mongoose/master/mongoose.h
[12] Beispielepaket von Mongoose: https://github.com/cesanta/mongoose/tree/master/examples/device-dashboard
[13] Webserver-Beispiel, net.c: https://raw.githubusercontent.com/cesanta/mongoose/master/examples/device-dashboard/net.c
[14] Webserver-Beispiel, packed_fs.c: https://tinyurl.com/packedfsc
[15] Step-7-Webserver-Directory: https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/tree/main/steps/step-7-webserver
[16] Beispiel: Erfolgreicher Lauf der Continuous Integration: https://tinyurl.com/bmgoodrun
[17] vcon.io: https://dash.vcon.io/
[18] Raspberry Pi W5500-EVB-Pico-Board: https://docs.wiznet.io/Product/iEthernet/W5500/w5500-evb-pico
[19] Flashing ESP32: https://vcon.io/docs/#module-flashing
[20] Netzwerk-Setup: https://vcon.io/docs/#module-registration
[21] Verdrahtung: https://vcon.io/docs/#module-to-device-wiring
[22] Webserver-Beispiel für Pico: https://tinyurl.com/picowebeg



MAKING AMAZING HAPPEN FOR A BETTER WORLD



SIE WOLLEN EINE BESSERE WELT ERSCHAFFEN? WIR AUCH.

Mit unseren Better World-Produkten übernehmen Sie Verantwortung für den Planeten.

de.rs-online.com

Mehr erfahren

RS



LoRa, ein Schweizer Taschenmesser

Teil 2: Hard- und Software

Von Gilles Brocard (Frankreich)

Während es im ersten Teil um das LoRa-Protokoll ging, wollen wir uns nun mit den Details der Konstruktion eines LoRa-Senders/Empfängers befassen, der ein kleines kommerzielles Modul verwendet. Gesteuert von einem Arduino Nano und einem Programm, das sich ganz der LoRa-Konfiguration, dem Senden und dem Empfangen widmet, wird die fertige Baugruppe zu einem echten „Schweizer LoRa-Taschenmesser“.

Die hier beschriebene kleine Baugruppe umfasst ein LoRa-Modul, eine Arduino-Nano-Platine, einen 5-V-Regler, einige LEDs und ein paar Schraubklemmen für den bequemen Anschluss beliebiger Sensoren, Steuerungen, eines OLED-I²C-Displays oder zusätzlicher LEDs. Der Aufbau ist sehr flexibel, was zum Teil auch auf das Programm zurückzuführen ist, also ein echtes Schweizer LoRa-Taschenmesser.
Der Schaltplan in **Bild 1** zeigt auch die Verbindungen zwischen dem Arduino Nano und dem Modul E220-900M30S, einen Spannungsregler mit einer Betriebsanzeige-LED sowie zwei weitere LEDs, die eine Übertragung (TX) oder einen Empfang (RX) signalisieren.
Andere Komponenten können über den Header K2 angeschlossen werden: Die Ports A0…A5 sind je nach Konfiguration analoge Eingänge oder digitale I/Os. A4 und A5 können auch als I²C-Bus konfiguriert werden, um I²C-Sensoren oder sogar ein kleines OLED-Display mit 128×64 Pixel anzuschließen. A6 und A7 sind zwei dedizierte Analogeingänge. Die analogen Eingänge des Nano haben eine Auflösung von 10 Bit. Der +5-V-Anschluss (Pin 10) kann entweder als Eingang oder als Ausgang fungieren.
Der Anschluss DIO2 des LoRa-Moduls ist mit dem Tx-Eingang des Antennenschalters und mit dem Gate von Transistor T1 verbunden, der als logischer Inverter fungiert. Der Drain steuert den Rx-Eingang desselben Antennenschalters.
Die weiße LED1 signalisiert eine Übertragung (TX), die grüne LED2 den Empfang (RX) eines gültigen LoRa-Signals, allerdings ohne Information über den Inhalt. Darüber hinaus aktiviert das Programm den Port A2 für eine Sekunde, wenn die erwartete Nachricht erkannt wird. Dies macht es sehr einfach, die Baugruppe als Fernsteuerung mit großer Reichweite zu verwenden.

Stromversorgung

Die Eingangsspannung an K3 sollte nicht mehr als 24 V betragen. Es ist auch möglich, die Baugruppe direkt über K4 mit 5 V zu versorgen. In beiden Fällen sollte das Netzteil bis zu 750 mA liefern können. Ein Kühlkörper für IC1 ist optional, da im LoRa-Modus das Sende-/Schlaf-Verhältnis sehr gering sein soll (maximal 1 %) und die durchschnittliche Verlustleistung dadurch sehr klein bleibt. In der Praxis könnte man bis zu 35 V am Eingang anlegen und selbst bei einer Stromaufnahme von 750 mA bei einem Ausgangssignal von 30 dB beträgt die gemittelte Verlustleistung so nur etwa 0,25 W (unter der Annahme, dass die Schaltung die restliche Zeit „verschläft“).

Die Platine

Die Platine in **Bild 2** misst 87×50 mm und kann in einem beliebigen Gehäuse untergebracht werden. Der Antennenausgang ist mit einem SMA-Stecker ausgestattet, der sich perfekt für Frequenzen im nahen Gigahertz-Bereich eignet (was bei BNC nicht der Fall wäre).
Die Verdrahtung ist einfach: Die LEDs, Widerstände und 100-nF- und 1-µF-Kondensatoren sind sämtlich große 1206-SMDs und deshalb einfach zu löten. Die anderen Bauteile sind bedrahtet. Wenn Ihre Platine keine durchkontaktierten Löcher besitzt (**Bild 3**), vergessen Sie nicht die Durchkontaktierungen anzubringen sowie die Masseverbindungen und die Pads von D4 und D5 auf beiden Seiten der Platine zu verlöten.
Für Langstreckenverbindungen (10 km oder mehr) ist es ratsam, die Schaltung in einem wasserdichten Gehäuse direkt unter der Antenne unterzubringen, die in einer gewissen Höhe (2 m über dem Boden ist optimal) montiert werden sollte. Dadurch werden die HF-Kabelverluste minimal gehalten. Eine andere Lösung wäre, den Arduino Nano durch einen ESP32 zu ersetzen. In diesem Fall werden die Nachrichten über WLAN weitergeleitet, bevor sie über LoRa gesendet werden. Die Änderungen am Sketch wären geringfügig.
Ein TX/RX-Schalter kann zwischen den Punkten D2 und Masse der Klemme K3 angeschlossen werden. Damit kann der Betriebsmodus jederzeit zwischen Senden (offen) und Empfangen (geschlossen) gewechselt werden. Wenn die Baugruppe ausschließlich in nur einem Modus verwendet werden soll, können Sie den Schalter auch weglassen und die Kontakte 1-2 von K1 überbrücken (empfangen) beziehungsweise offen lassen (senden).

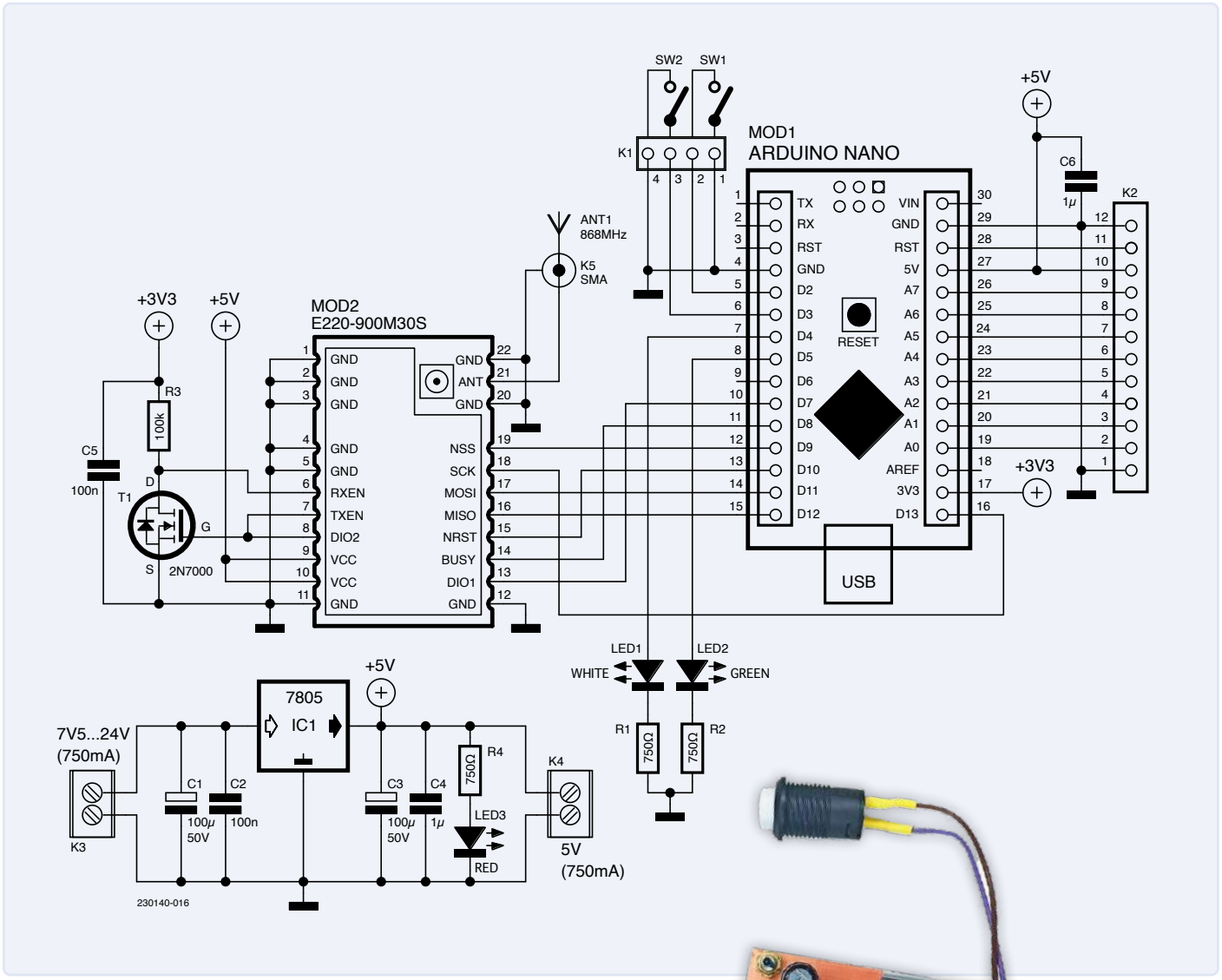


Bild 1. Schaltung des Schweizer LoRa-Taschenmessers.

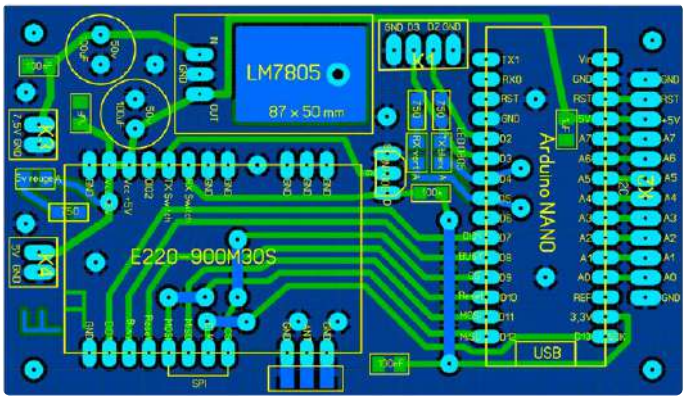


Bild 2. Platinenlayout und Quellcode-Dateien sind auf der Webseite zu diesem Artikel [1] verfügbar.

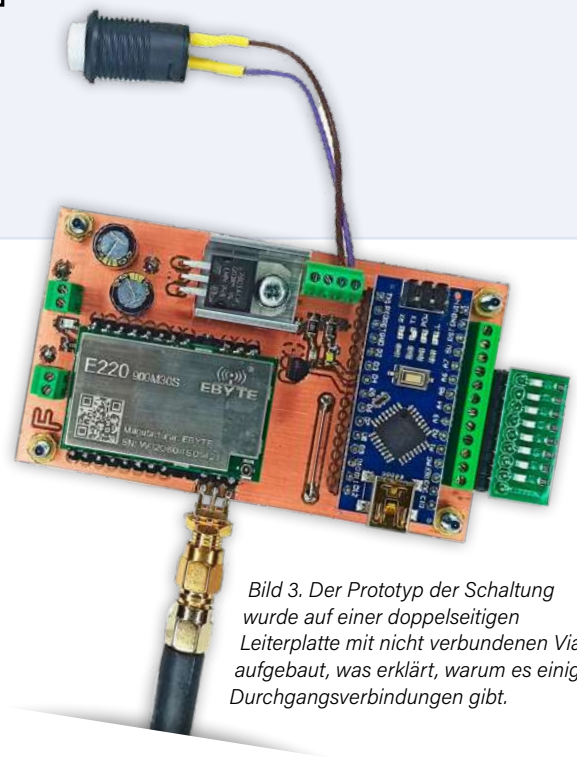


Bild 3. Der Prototyp der Schaltung wurde auf einer doppelseitigen Leiterplatte mit nicht verbundenen Vias aufgebaut, was erklärt, warum es einige Durchgangsverbindungen gibt.

Das Programm

Der Sketch [1] ermöglicht es Ihnen, die LoRa-Konfiguration für alle Arten von Experimenten und zu Versuchen zur LoRa-Übertragung mit großer Reichweite leicht zu ändern. Die Software erlaubt auch das Umschalten zwischen Senden (TX) und Empfangen (RX) von Nachrichten. Der Anschluss von vielen analogen oder digitalen (I²C-) Sensoren ist ebenfalls möglich. Im Kasten *Kurzanleitung für das Steuerprogramm des LLCC68* erfahren Sie, wie der Sketch aufgebaut ist.

Die wichtigsten LoRa-Konfigurationsparameter

Alle LoRa-Konfigurationsparameter befinden sich zwischen Zeile 83 und Zeile 111:

- Zeile 83: Der Toggle für den LoRa-Betrieb.
- Zeile 84: Konfiguration von FS, BW, CR, und LDRO.
- Zeile 99: Die Parameter des Sendepakets werden in neun Bytes konfiguriert; die letzten drei sind bei FSK-Modulation üblich.

LoRa-Optimierung

Der empfangende LLCC68 kann den Sender über die Qualität des Signalempfangs informieren, so dass der Sender die Übertragungsparameter (Leistung, SF, CR, und so weiter) anpassen kann. Dies ist eine der Möglichkeiten zur Anpassung, die von der LoRaWAN-Schicht genutzt werden.

- **RSSI** (*Received Signal Strength Indication*) ist der Wert der empfangenen Signalstärke, den der Empfänger an den Sender zurücksenden kann. Dieser kann daraufhin die Sendeparameter ändern, seine Sendeleistung erhöhen oder verringern, um die Akkulaufzeit zu erhöhen und gleichzeitig eine ausreichende Sendeleistung aufrechtzuerhalten.
- Die **Empfindlichkeit**. Der LLCC68 kann den minimalen Empfangspegel messen, der es ihm gestattet, ein Signal fehlerfrei zu extrahieren. Dieser Wert ist im Fall des LLCC68 sehr niedrig, da er je nach gewählten Parametern bis zu -129 dBm betragen kann.
- Das **SNR** (Signal-Rausch-Verhältnis) ist das Verhältnis zwischen der Leistung des empfangenen Signals und dem Rauschpegel der Umgebung, den das LLCC68 außerhalb des Zeitraums des Datenempfangs misst. Bei LoRa kann der Rauschpegel erheblich höher sein als der des Signals (negatives SNR).
- Die Funktion **GetStats** liefert die Gesamtzahl der empfangenen Pakete, die Anzahl der fehlerhaft empfangenen Pakete und die Anzahl der Pakete mit Header-Fehlern. Die Anweisung ResetStats setzt alle Statistiken zurück.

Die Lektüre des 106-seitigen Datenblatts ist zwar nicht unbedingt erforderlich, aber doch sehr nützlich, um einige der in diesem Artikel angesprochenen Themen zu vertiefen. Wenn Sie der französischen Sprache mächtig sind, lohnt sich auch das Studium des bemerkenswerten Dokuments, das von den Lehrern des Lycée Dorian verfasst wurde [3] und die physikalische LoRa-Schicht, aber auch die des LoRaWAN und die LoRa-Demodulation behandelt, zu der Semtech keine Angaben macht.

Bei jeder dieser drei Programmzeilen ist das erste Byte kein Konfigurationsbyte, sondern der Opcode (der Befehl), der dem LLCC68 sagt, was er mit den folgenden Bytes tun soll. Insgesamt gibt es 41 Opcodes. Einzelheiten dazu finden Sie im Datenblatt, ebenso wie die Adressen der 36 Konfigurationsregister.

SF - Der Spreizfaktor

Die Empfindlichkeit des analogen Empfangspfads kann nur durch die konfigurierbare Verstärkung des Eingangsvorverstärkers verändert werden (Zeile 154). Aber wie wir gesehen haben, sinkt die Datenrate umso weiter, je mehr wir den Wert von SF erhöhen. Da die Effizienz der digitalen Rekonstruktion der Nachricht umgekehrt proportional zur Datenrate ist, steigt die digitale Empfindlichkeit mit dem Wert von SF (ebenso wie die Übertragungszeit). Dadurch erhöht sich die Empfindlichkeit des analogen Teils, was zu höheren Empfindlichkeitswerten und damit zu einer größeren Reichweite führt.
SF entspricht auch der Anzahl der Bits, die im Zeitraum T_s, also pro Symbol übertragen werden. Die Übertragungszeit eines Symbols T_s und einer Nachricht von 24 Byte ist in **Tabelle 1** dargestellt. Semtech stellt auf seiner Website [2] einen Online-Rechner zur Verfügung (**Bild 4**), mit dem sich die Übertragungszeit, die Stromaufnahme und das Link-Budget genau berechnen lassen. Zögern Sie nicht, diesen Rechner zu benutzen, denn obwohl er nicht speziell für den LLCC68 (sondern für den SX1272 bis SX1277) entwickelt wurde, sind die Ergebnisse fast identisch. Wenn Sie den Wert von SF auf den nächsten Wert erhöhen, verdoppelt sich die Übertragungszeit fast, wie Sie in Tabelle 1 sehen können. Der Wert der Datenrate (Bitrate) R_B wird nach folgender Formel berechnet

$$R_B = SF \times (BW / 2^{SF}) \times 4/(4+CR) \text{ (bits/s)}$$

Da SF gleich der Anzahl der Bits pro Symbol ist, kann man die Baudrate R_s (Symbolrate) berechnen:

$$R_s = R_B / SF \text{ (baud)}$$

Mit den drei verfügbaren Werten BW, SF und CR können wir die gewünschte Übertragungsgeschwindigkeit leicht konfigurieren.

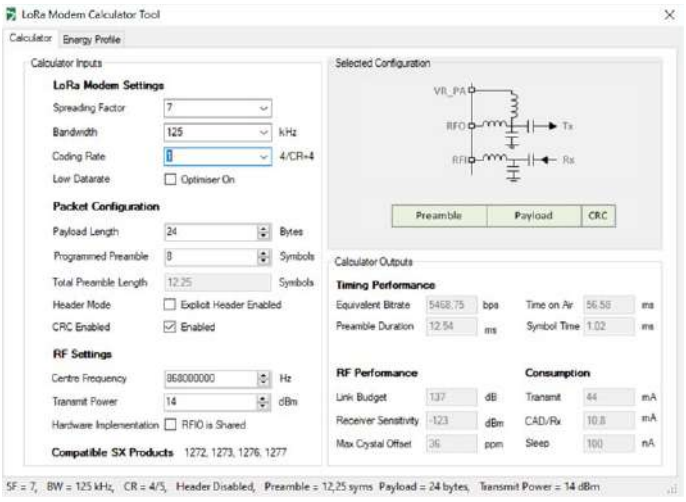


Bild 4. Es gibt auch eine Online-Version des LoRa-Modem-Rechners von Semtech.

CR - Die Coderate

LoRa ermöglicht es, die Zuverlässigkeit der Übertragung durch Redundanz des Signals zu erhöhen. Bei CR = 1 beträgt die Redundanzrate 4/5, was bedeutet, dass fünf Bits zur Codierung von jeweils vier Datenbits verwendet werden. Bei CR = 4 beträgt die Rate 4/8, wobei acht Bits zur Codierung von vier Datenbits verwendet werden. Da jeder Vorteil auch seine Kehrseite hat, führt eine Erhöhung der CR zu einer Verringerung von R_B und infolgedessen zu einer Verlängerung der Nachrichtenübertragungszeit.

BW - Die Bandbreite

Die Bandbreite wird auch als die spektrale Auslastung des modulierten Signals bezeichnet. Die Variation eines *Chirps* (**Bild 5**), die sich von F **-** df bis F **+** df erstreckt, bestimmt die belegte Bandbreite. Da

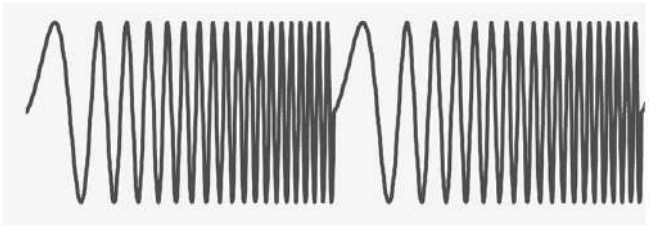


Bild 5. Darstellung von zwei Chirps (zur Veranschaulichung mit „übertriebener" Modulation).

Tabelle 1: Übertragungszeiten als Funktion des Spreizfaktors SF.

SF	R_b (bit/s)	R_s (baud)	Präambel-zeit (ms)	T_s (ms)	Übertragungs-zeit (ms)
5	15,625	3,125	3,135	0,256	16,37
6	9,375	1.562,5	6,27	0,51	30,85
7	5.468,75	781,3	12,54	1,02	56,58
8	3,125	390,6	25,09	2,05	102,91
9	1.757,8	195,3	50,18	4,10	185,34
10	976,5	97,7	100,35	8,19	370,69
11	537,11	48,8	200,70	16,38	659,46

Diese Werte sind ohne Header angegeben. Das Vorhandensein eines Headers erhöht diese Zeitspannen. Hier ist CR = 1, BW = 125 kHz, eine Nachricht (Nutzlast) enthält 24 Bytes und eine Präambel besteht aus 8 + 4,25 = 12,25 Symbolen. $T_s = 2^{SF}/BW$.

Der Spreizfaktor SF entspricht auch der Anzahl der während der Zeit T_s übertragenen Bits. Die Werte R_b und R_s in der Tabelle wurden mit dem Berechnungstool von Semtech ermittelt, das mit den Produkten SX1272 bis 1277 kompatibel ist, und, obwohl nicht ausdrücklich angegeben ist, auch mit dem LLCC68. Hinweis: Die Übertragungsverzögerungen R_b eines Bits der Nutzlast und eines Bits der Präambel sind nicht identisch!

R_B proportional zu BW ist, kann die Übertragungszeit der Nachricht durch die Wahl eines größeren Wertes für BW reduziert werden. Im Gegensatz zu den anderen Parametern hat eine solche Erhöhung keinen praktischen Nachteil, abgesehen von der Überlastung des Frequenzbandes.

Optimierung der Daten für niedrige Datenraten

In Anbetracht der potentiell langen Paketlaufzeit bei hohen SF-Werten (10 oder 11) muss die Option *Low Data Rate Optimization* (LDRO) aktiviert werden. Sie erhöht die Zuverlässigkeit der Übertragung gegenüber eventuellen Frequenzschwankungen während der Sende- und Empfangszeit des Pakets. Dies ist erforderlich, wenn die Dauer eines Symbols T_S mehr als 16 ms beträgt. In Tabelle 1 ist beispielsweise zu sehen, dass bei SF = 11 LDRO verwendet werden muss, da $T_S > 16$ ms ist. Der Sender und der Empfänger müssen denselben LDRO-Wert verwenden.

Übertragungsgeschwindigkeit

Übertragungsgeschwindigkeit und -reichweite von LoRa-Nachrichten hängt von den Werten von SF, CR, BW und LDRO ab, aber auch von der Entscheidung, ob ein Header vorhanden ist (explizite Option) oder nicht (Standardoption), und wie lang der Header ist, wenn vorhanden.

Kurzanleitung zum LLCC68-Steuerprogramm

Der 48 KB große Sketch besteht aus 571 Zeilen, von denen der größte Teil ein ausführlicher, aber französischsprachiger Kommentar ist. Diese Anmerkungen beziehen sich auf die Seitenzahlen des LLCC68-Datenblatts. Das Programm ist einfach strukturiert, so dass es an jede Art von Anwendung angepasst werden kann.

Zeile 1: Das Programm enthält die SPI.h-Bibliothek. Sie ist Teil der integrierten Arduino-Bibliotheken und braucht nicht extra installiert zu werden.
Zeilen 5…15: Zwei Tabellen, eine zum Speichern der zu sendenden Nachricht (TX), die andere zum Speichern der empfangenen Nachricht (RX).
Zeilen 17…28: Initialisierung der Eingangs- und Ausgangsklemmen, die eine Anpassung an jede Art von Anwendung ermöglicht.
Zeilen 31…48: Deklaration der notwendigen Variablen für die internen Berechnungen des Sketches und der Adressen der vom Programm verwendeten Register des LLCC68.
Zeilen 50…56: Deklaration der allgemeinen Konfigurationsvariablen des LLCC68.
Zeilen 57…81: Deklaration der Variablen, die für die FSK-Modulation spezifisch sind (die letzten drei Paketparameter sind für LoRa üblich).
Zeilen 83…111: Deklaration der Variablen für die LoRa-Modulation.
Zeilen 113…170: Deklaration der Konfigurationsvariablen für alle HF-Funktionen des LLCC68.
Zeile 172: Die bei Arduino erforderliche `setup()`-Funktion.
Zeile 197: Die andere erforderliche Arduino-Funktion ist `loop()`. Sie ist in zwei Teile unterteilt. Der RX/TX-Modus-Schalter bestimmt, welcher Teil ausgeführt wird.
Zeilen 232…277: Fünf Funktionen zur Korrektur bestimmter Beschränkungen des LLCC68 (siehe Kapitel 15 des Datenblatts).
Zeilen 278…311: Die Funktionen `Message()`, `busy()` und `RX_Wait()`, die im RX-Modus verwendet werden. In der Funktion `RX_Wait()` wartet eine Endlosschleife auf den Empfang einer gültigen LoRa-Nachricht. Der Modusschalter ermöglicht es, die Schleife zu verlassen und vom RX- zum TX-Modus überzugehen.
Zeilen 313…355: `TXRX_Setup()`, die gemeinsame Funktion für RX und TX, dann `TX_Setup()` für die Konfiguration des Sendemodus und `RX_Setup()` für den Empfangsmodus.
Zeile 356: Die Funktion `TX_Send()`, die den TX-Modus und die Übertragung einer Nachricht startet.
Zeile 371: Die Funktion `RX_Read()`, die den RX-Modus startet und das Programm in eine Endlosschleife versetzt, die auf eine gültige LoRa-Nachricht wartet.
Zeile 411: Mit `Fsk_Setup()` wird der FSK-Modus konfiguriert.
Zeile 433: `Lora_Setup()` konfiguriert den LoRa-Modus.
Zeilen 454…483: Gruppiert die SPI-Funktionen, dann die `Status()`-Funktion für den Zugriff auf den Status des LLCC68.
Zeilen 484…571: Gruppiert die Funktionen `Affichage_GetRssi()`, `Affichage_GetRssiInst()` und `Affichage_GetStats()` zur Messung von RSSI, SNR und zum Abrufen von Statistiken, wie Übertragungsfehler und Anzahl der Nachrichten. Sie können erneut aufgerufen werden, um die Verbindung zu optimieren.

Zurück zu den E220-900T-Modulen

Die im ersten Teil des Artikels [4] vorgestellte Software zur Steuerung der E220-900T22- oder 30-Module erlaubt es nicht, die LoRa-Parameter zu konfigurieren. Die Parameter werden automatisch eingestellt, wie sie am besten geeignet sind, um die gewünschte Übertragungsgeschwindigkeit zu erreichen. Das ist sehr schade, denn jede Konfiguration hat ihre Vor- und Nachteile. Aus diesem Grund haben wir uns für das Modul E220-900M30S entschieden, das über seine SPI-Schnittstelle völlige Flexibilität bei der Konfiguration bietet.

Benutzung der Software

Alle Befehle und Konfigurationen, mit Ausnahme derjenigen, die spezifisch für Ihren Sensor sind, werden am Anfang des Sketches gesammelt und sind reichlich kommentiert. Während der Ausführung des Sketches können Sie hingegen seine Funktionsweise Schritt für Schritt im Seriellen Monitor auf Ihrem PC verfolgen, da er viele `serial.print()`-Aufrufe enthält. Weitere Einzelheiten finden Sie auch in der *Kurzanleitung für das Steuerprogramm des LLCC68.*

Senden einer Nachricht (TX)

In Zeile 6 befindet sich ein Schreibpuffer, der bei jedem Start des Sketches Ihre Nachricht enthalten muss. Ersetzen Sie dazu die ASCII-Codes in Zeile 7 und Zeile 8 durch Ihre Nachricht (maximal 127 Bytes, in ASCII). Wenn es sich bei Ihrer Nachricht um einen numerischen Wert handelt (zum Beispiel den Messwert eines Sensors), müssen Sie ihn erst in ASCII umwandeln, bevor Sie ihn in die Tabelle schreiben. Halten Sie sich an das Format der Tabelle. Ändern Sie die ersten beiden Bytes nicht - 0x0E ist der Befehl (Opcode), den der LLCC68 benötigt, um in den Puffer zu schreiben; 0x80 ist die Adresse des Sendebereichs des Puffers. Sie müssen aber das dritte Byte setzen, das die Gesamtzahl der Bytes Ihrer Nachricht angibt. Es wird von der Wiederherstellung der Nachricht bis zum Zeitpunkt des Empfangs verwendet. Hinweis: Alle Werte sind in hexadezimaler Form angegeben.
Je nach Länge Ihrer Nachricht müssen Sie möglicherweise einige weitere Parameter anpassen: Die maximale Länge der Nachricht (Zeile 99, Byte 4 und Byte 7), sowie Zeile 125 und Zeile 126 für den Empfang. In Zeile 122 können Sie die Position des Empfangs- und Sendepuffers ändern; die LoRa-spezifischen Parameter befinden sich in den Zeilen 83...112.
Bringen Sie den Schalter SW_1 in die Position TX (offen) und starten Sie dann den Sketch neu. Ihre Nachricht wird dann in regelmäßigen Abständen gesendet, getrennt durch eine programmierbare Verzögerung (Zeile 229). Wahrscheinlich müssen Sie das Verhältnis zwischen Sende- und Ruhezeit nachjustieren, damit es nicht über 1% steigt, was dem gesetzlicher Grenzwert für LoRa-Übertragungen entspricht.

Empfangen einer Nachricht (RX)

Bringen Sie den Schalter SW_1 in die Position RX (geschlossen) und starten Sie dann das Programm neu. Es wartet dann auf den Empfang einer gültigen LoRa-Nachricht, die automatisch im Empfangspuffer (Zeile 14) abgelegt wird. Sie müssen sie dann nur noch lesen.
Eine andere Möglichkeit besteht darin, die RX-Funktion in Zeile 37 zu ändern, die es ermöglicht, eine empfangene Nachricht in der Schleife (Zeilen 381...396) wiederherzustellen. In einem if-Vergleich wird das Byte 0x0A erkannt, was dazu führt, dass die Flag-Variable `Message_Valide` auf 1 gesetzt wird. Das Beispiel lässt eine LED auf der Platine aufleuchten, könnte aber auch als Fernsteuersignal verwendet werden.

Einige Anwendungsideen

Ein GPS-Signal für ein Tier, einen Menschen oder ein anderes Objekt ist nur ein Anwendungsbeispiel für unser Schweizer LoRa-Taschenmesser. Aber das Programm, das wir entwickelt haben, ist sehr vielseitig und eignet sich für eine große Anzahl anderer Anwendungen vor, zum Beispiel:

- Sammeln von Daten (Bodenfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung, et cetera) für landwirtschaftliche Zwecke oder eine Wetterstation.
- Ein Hausautomatisierungssystem, das sich auf einen Garten, einen Park, mehrere Häuser, eine ganze Straße oder sogar ein Dorf erstreckt.
- Überwachung (Feuer, Sicherheit) oder Telemetrie eines großen oder isolierten Bereichs (Schwimmbad, Sportplatz, Industrieanlage und so weiter).
- Zentrale Verteilung der Uhrzeit, der Mondphasen und der wichtigsten Planetenparameter an Empfangsuhren, die sich an einem Haus oder einem größeren Gebäude (Museum, Rathaus) oder in einem ganzen Stadtviertel befinden.

Es gibt noch viel mehr, und wahrscheinlich haben sich in Ihrer Fantasie noch andere Ideen festgesetzt...

RG – 230140-B-02

Der europäische Standard

Sie können mit dem LoRa-Protokoll im 868-MHz-Band senden, wenn Sie die europäischen Regeln einhalten. Hier die wichtigsten Punkte:

1. Senden Sie nicht außerhalb des 868-MHz-Bandes.
2. Verwenden Sie keine größere Bandbreite als BW = 500 kHz.
3. Überschreiten Sie nicht die Sendeleistung von 14 dBm (25 mW). Damit ist die „in die Luft" abgestrahlte Leistung gemeint, so dass die Leistung am Ausgang des Moduls je nach den Verlusten zwischen Modul und Antenne auch deutlich höher sein kann.
4. Senden Sie nicht länger als 1 % der Zeit (Duty Cycle). Das heißt, wenn die Übertragung einer Nachricht 0,1 s dauert, dürfen Sie nur alle 0,1×100 = 10 s eine neue Nachricht senden, also sechsmal pro Minute (was für viele Anwendungen völlig ausreichend ist).

Schauen wir uns ein Beispiel an. Wenn Ihr Begleiter wie beim Autor ein Beagle-Hund ist, der es liebt, wegzulaufen, und Sie seine GPS-Koordinaten wissen wollen, damit Sie ihn auf seinen Streifzügen finden können, kann ein Halsband mit einem GPS-Empfänger, einem LoRa-Sender und einer kleinen Batterie Ihre Probleme lösen. Sechsmal pro Minute sendet es die Position Ihres Hundes. Das Signal lässt sich in einem Umkreis von 10 km in offenem Gelände empfangen. Das Gerät verbraucht sehr wenig Strom und wir haben ein leichtes, kleines System mit großer Autonomie.



Über den Autor

Gilles Brocard ist ein beratender Ingenieur im Ruhestand und Ausbilder für analoge elektronische Simulationssoftware (LTspice). Er ist auch ein Spezialist für die Entwicklung von On-Board-Gleichspannungswandlern (SMPS).

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Wenden Sie sich an den Autor unter brocard.gilles.b26@gmail.com, oder an das Elektor-Team unter redaktion@elektor.de.

Passende Produkte

- **Great Scott Gadgets HackRF One Software Defined Radio (1 MHz bis 6 GHz)**
  SKU 18306: www.elektor.de/18306
- **CircuitMess Chatter - DIY LoRa Communicator**
  SKU 20407: www.elektor.de/20407
- **Claus Kühnel, LoRaWAN-Knoten im IoT, Elektor 2023**
  Buch, kartoniert, deutsch: www.elektor.de/19950
  E-Buch, PDF: www.elektor.de/19951

WEBLINKS

[1] Quellcode und Platine: https://elektormagazine.de/230140-B-02
[2] Berechnungsprogramm für LoRa-Modems: https://lora-developers.semtech.com/build/tools/calculator
[3] Lycée Dorian: „Caractérisation de l'interface radio LoRa d'un réseau de communication LoRaWAN", eduscol.education.fr: https://elektormagazine.fr/lycee-dorian
[5] Teil 1 dieses Artikels: https://elektormagazine.de/230140-02

Digitale Statusübertragung *leicht* gemacht



Sie haben die Ideen, wir die Lösung

Das 2,4 GHz Funkfernsteuersystem **KST2.4S/KSR2.4** ermöglicht eine einfache Übertragung von 6 digitalen Zuständen (z.B. Ein/Aus) zur Steuerung und Überwachung von Maschinen und Anlagen. Dank Frequenzhopping lassen sich mehrere Systeme in einem Gebiet gleichzeitig betreiben (ohne Kanalmanagement). Hamming-Distanz 6 und CRC-16 Fehlererkennung sorgen für eine zuverlässige Funkkommunikation.

Nutzen Sie **unsere Technologie** und **Kompetenz** für Ihre Ideen

www.circuitdesign.de

CIRCUIT DESIGN, INC.

MEMS-Mikrofone

Entwurf und Konstruktion eines Messmikrofons

Von Peter Riccardi (USA)

Sie können Unsummen für ein Freifeldmikrofon ausgeben, aber bevor Sie das tun, sollten Sie diese MEMS-basierte Konstruktion in Betracht ziehen, die Ihnen eine hervorragende Leistung zu einem Bruchteil der Kosten bietet.

Akustiker und Akustikingenieure sind häufig auf Messmikrofone angewiesen, um bei Experimenten akustische Signale zu erfassen. Typische Freifeld-Kondensatormikrofone von Firmen wie Brüel & Kjær kosten aber (weit) über 1.000 €. Ja, die Qualität solcher Mikrofone ist hervorragend, aber es gibt Alternativen für Hobbyisten, Studenten und Maker, die die gewünschte Leistung zu einem Bruchteil der Kosten erbringen. Hier wird ein MEMS-basierter Entwurf auf ein möglichst niedriges Grundrauschen und einen flachen Frequenzgang im Audioband von 20 Hz bis 20 kHz hin untersucht.

Der Prototyp muss kostengünstig, einfach aufzubauen und zu montieren sein und sich nahtlos in den typischen Arbeitsablauf eines experimentellen Akustikers einfügen. Die MEMS-Mikrofontechnologie hat sich in den letzten Jahren bedeutend verbessert, so dass ihr Grundrauschen ähnlich niedrig wie ihr Preis ist. Wir machen uns dies zunutze, indem wir mehrere Mikrofone in einem parallelen Array zusammenschalten und durch analoge Mittelwertbildung das Rauschen weiter verringern. Messmikrofone und viele andere piezoelektrische Aufnehmer (wie Kraft-, Druck- und Beschleunigungssensoren) werden von einer standardisierten Impedanzwandler-Elektronik abgeschlossen und über diese mit Strom versorgt, die unter der Bezeichnung IEPE (Integrated Electronics Piezo Electric) [1] bekannt ist.

Elektrischer Entwurf

Es gibt viele Arten von MEMS-Mikrofonen, die für die Verwendung in diesem Projekt in Frage kommen. Hier wurde das TDK ICS-40300 aufgrund seines rückwärtigen Volumens gewählt, das nicht nur einen im unteren Bereich erweiterten Frequenzgang von 6...20.000 Hz aufweist, sondern auch eine ordentliche Empfindlichkeit von -45 dBV bei einem SPL von 94 dB und ein niedriges Grundrauschen von -108 dBV. Mechanisch ist das Mikro-Array in einem Röhrchen mit einem Durchmesser eines 0,5"-Mikrofons untergebracht. Durch diesen Formfaktor lässt es sich einfach in einem Akustiklabor mit vorhandenen Kalibratoren, Mikrofonständern und so weiter verwenden. Über einen BNC-Stecker auf der Rückseite des Röhrchens wird die IEPE eingespeist und das spannungsmodulierte Signal ausgegeben. Um das Grundrauschen zu verringern, sind vier Elemente als Array geschaltet, was das maximale Rauschen um 6 dB verringert. Um einen möglichst großen Dynamikbereich zu erzielen, verstärkt ein Vorverstärker das Mikrofonsignal in die Nähe der Versorgungsschiene auf (hier) 3,3 V. Laut Datenblatt beträgt die maximale Ausgangsspannung des Mikros 0,355 V_{eff} bei einem Schalldruckpegel von 130 dB. Einige schnelle Berechnungen liefern eingängigere Werte.

Zunächst sollte die Empfindlichkeit in mV/Pa ausgedrückt werden. Der Schalldruckpegel (SPL) hat die Form:

$$dB\ SPL = 20 \times \log_{10}(P_{eff}/P_{ref})$$

Der SPL ist ein also Dezibelwert. P_{eff} ist der quadratische Mittelwert des gemessenen Drucks, P_{ref} der Referenzdruck (20 µPa in Luft). Nach einer einfachen Überschlagsrechnung ergeben sich 1,417 Pa_S bei der Nennempfindlichkeit von -45 dBV. Nun muss die Spannung (in Millivolt) auf ähnliche Weise aus dem vorgegebenen Wert von -45 dBV abgeleitet werden. In diesem Fall wird eine „Referenzspannung" von 1 V angenommen:

$$dBV = 20 \times \log_{10}(U/1\,V)$$

was eine Spitzenspannung von 5,623 mV_S ergibt. Hinweis: SPL geht per Definition vom Effektivwert einer Druckwelle aus. Die Spannung ist ein einfaches Dezibel, so dass Zähler wie Nenner der Logarithmusfunktion als Spitzenwerte angenommen werden. Dividiert man die Spitzenspannung durch den Spitzendruck, ergibt sich die Empfindlichkeit wie folgt:

$$Empfindlichkeit = 5{,}623\ mV_S/1{,}417\ Pa_S = 3{,}968\ mV/Pa$$

Die Empfindlichkeit wird mit einer eventuellen Verstärkung im Vorverstärker multipliziert, so dass sie (mit A als Verstärkung) wie folgt umgeschrieben werden kann:

$$Empfindlichkeit = 3{,}968\ mV/Pa \times A$$

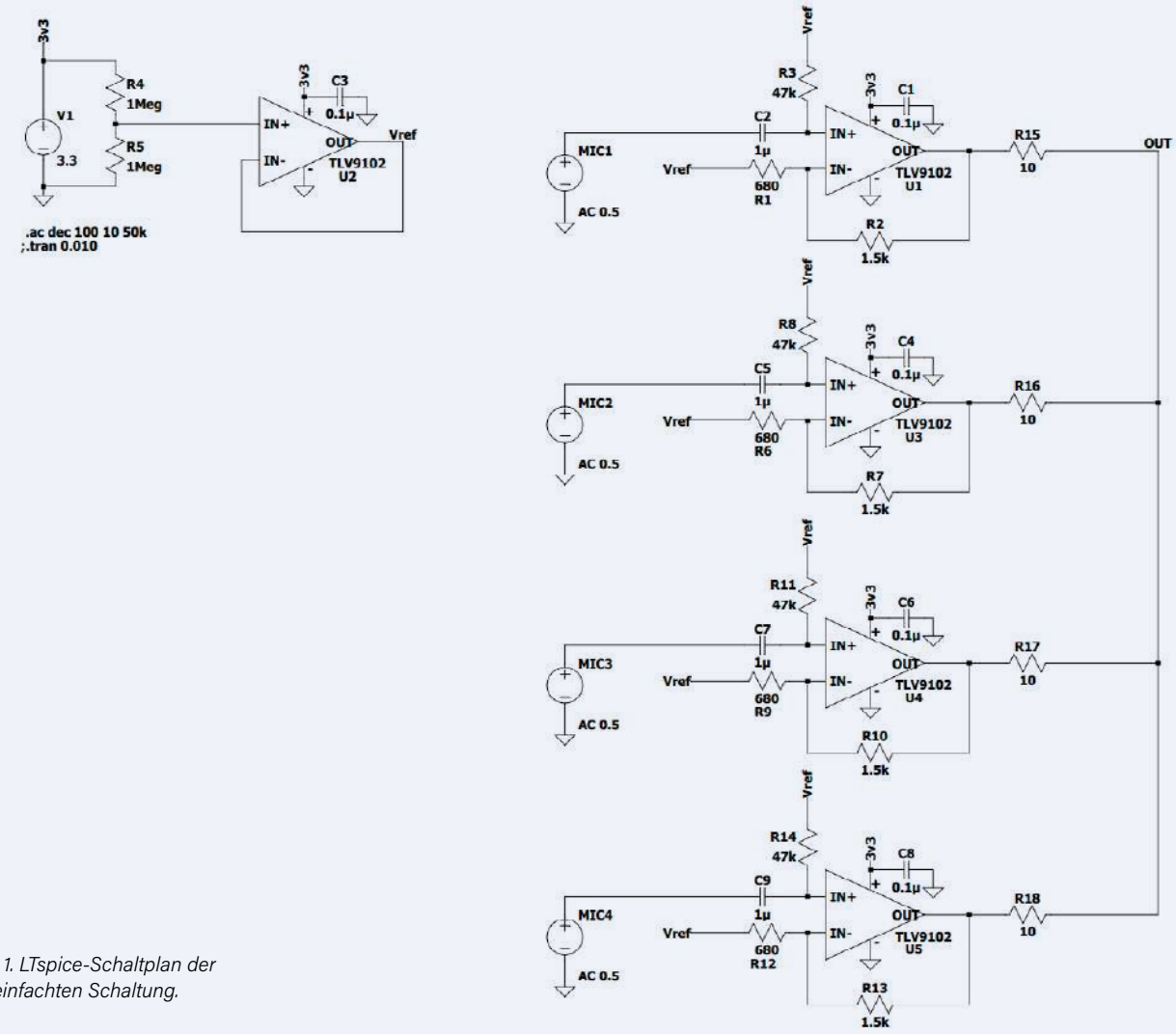


Bild 1. LTspice-Schaltplan der vereinfachten Schaltung.

Dies ist zwar weit entfernt von dem üblicheren Messwerten im Bereich von 50 mV/Pa, aber ein notwendiger Kompromiss, um die Niederspannungs-MEMS-Elemente in einem großen dynamischen Bereich von Druckamplituden bis zu 130 dB SPL zu verwenden.
Ein typisches (Niederspannungs-)Kondensatormikrofon produziert bis zu 20 V_{SS}. Die Empfindlichkeit kann durch eine zusätzliche Verstärkung durch den Vorverstärker erhöht werden. Um den Dynamikbereich unseres Systems zu maximieren, muss ein Headroom berücksichtigt werden. Es werden deshalb Low-Voltage-Verstärker mit 3,3-V-Rail-Betrieb gewählt. Dies garantiert einen niedrigen Strombedarf und maximiert gleichzeitig den Spannungshub, den das System erzeugen kann. Das Datenblatt gibt die maximale Ausgangsspannung des Mikrofons bei dem höchsten Nenndruck an, den es messen kann. Dieser Wert kann zur Berechnung der Verstärkung verwendet werden. Laut Datenblatt beträgt die maximale Ausgangsspannung:

U_{out} = 0,355 V_{eff}

Die Spitze-Spitze-Ausgangsspannung beträgt dann ungefähr:

U_{out} = 0,355 × 1,414 = 1 V_{SS}

Der Gesamthub eines Rail-to-Rail-Operationsverstärkers, der an einer unipolaren 3,3-V-Schiene betrieben wird, beträgt etwa 3,3 V. Die Verstärkung, um das Signal maximal anzuheben, wäre daher wie folgt:

$$A = \frac{Output}{Input} = \frac{3{,}3\ V_{SS}}{1{,}00\ V_{SS}} = 3{,}3$$

Dies erfordert auch eine virtuelle Masse von 3,3 V / 2 = 1,65 V, die in diesem Entwurf als Referenzspannung U_{ref} bezeichnet wird. Die Mikrofonelemente können einen beträchtlichen Gleichspannungsoffset aufweisen, so dass die Ausgänge der einzelnen Mikrofone über ein einfaches RC-Filter wechselspannungsgekoppelt werden müssen. Hier werden ein 1-µF-Kondensator und ein 47-kΩ-Widerstand verwendet, wodurch sich eine Grenzfrequenz ergibt von:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{6{,}28 \times 47.000 \times 0{,}000001} = 3{,}4\ Hz$$

Die relativ hohe Grenzfrequenz wurde gewählt, damit für den Kondensator mit geeigneten Spannungswerten ein kleiner 0603-SMD verwendet werden kann.

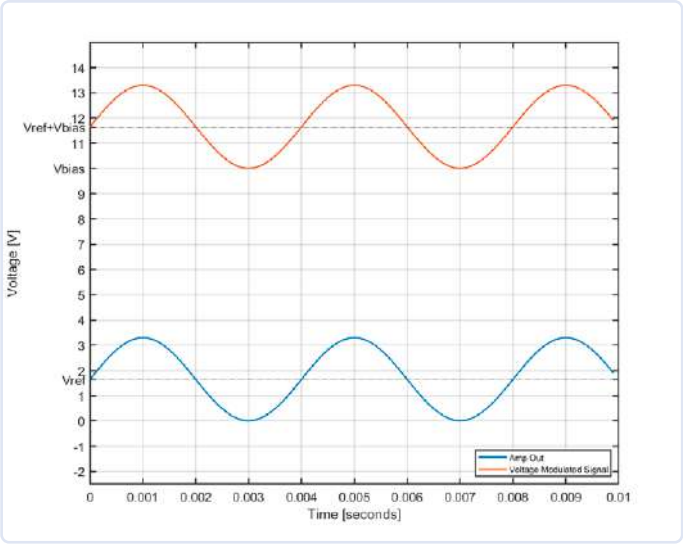


Bild 2. Typische Wellenformen und Vorspannung in einem IEPE-gespeisten System. Hier ist eine 250-Hz-Sinuswelle das eingespeiste Signal. Die blaue Kurve ist das Ausgangssignal am Mittelungsknoten. Das Ausgangssignal ist auf die Referenzspannung U_{ref} vorgespannt und oszilliert um diese Gleichspannung. Durch Verschieben dieser Spannung um eine andere Spannung U_{bias} kann der Ausgang so eingestellt werden, dass er mit einer Gleichspannung arbeitet, die etwa der Hälfte der erwarteten Compliance-Spannung eines IEPE-Messgeräts entspricht. Als Referenz wurde der 4431 von National Instruments verwendet, der 2,1 mA bei einer Spannung von über 20 VDC erzeugt. Daher wurde ein Wert von etwa 10...15 VDC als Arbeitspunkt des Systems gewählt.

Schaltung

Die vereinfachte Schaltung in **Bild 1** soll die vorgeschlagene Topologie veranschaulichen. Der Ausgangsknoten mit den 10-Ω-Widerständen stellt eine analoge Mittelungsschaltung dar. Theoretisch wären das Rauschen aller Operationsverstärker und das elektrische Rauschen der MEMS-Mikrofone unkorreliert, so dass eine maximale Reduktion des Grundrauschens von 6 dB erreichbar wäre. Dies wird aber dadurch verkompliziert, dass das Rauschen am Ausgang nicht nur auf die Elektronik zurückzuführen ist. Die MEMS-Mikrofone unterliegen nämlich auch akustischem Rauschen, das durch die molekularen Wechselwirkungen der Luft in Kontakt zu den Membranen entsteht. Das Thema Rauschen im Zusammenhang elektrischer Schaltungen und akustischer Systeme ist äußerst komplex und würde den Rahmen dieses Artikels bei weitem sprengen. Gehen wir deshalb davon aus, dass die elektrischen Rauschquellen unkorreliert sind, und hoffen wir, dass dies auch bei einem Großteil des akustischen Rauschens der Fall ist. Zumindest wird das unkorrelierte akustische Rauschen gemittelt. Interessierte Leser finden unter [2] und [3] weiteres Material zum Thema Rauschen.

Ein Hinweis zu Bild 1: Es wird eine 3,3-VDC-Schiene erzeugt, an der ein hochohmiger Spannungsteiler eine Referenzspannung erzeugt, die der Hälfte der Versorgungsspannung entspricht. Die vier MEMS-Elemente sind parallel geschaltet, jedes mit seinem eigenen Vorverstärker mit einer nominalen Verstärkung von A = 3,2. Das RC-Filter am Eingang entfernt den Gleichspannungsoffset der MEMs-Elemente, während gleichzeitig die Referenzspannung in den nicht-invertierenden Anschluss gespeist wird. Die Ausgänge der einzelnen Operationsverstärker sind über niederohmige Widerstände miteinander verbunden. So können die Spannungen an ihrem Ausgangsknoten wirkungsvoll gemittelt werden, ohne dass ein Kurzschluss zwischen den Anschlüssen entstehen und die internen Ausgangstransistoren belasten würde.

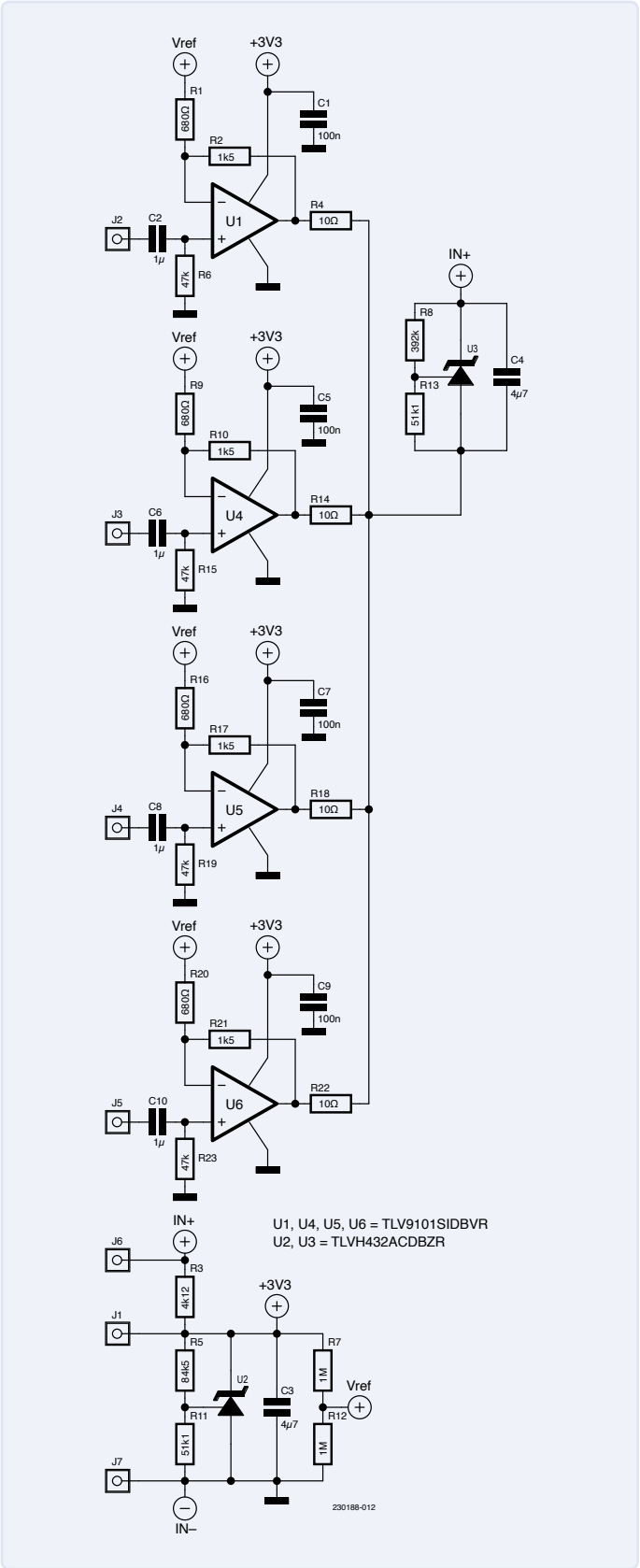


Bild 3. Der Schaltplan für die entworfene, aufgebaute und getestete Schaltung. Der Puffer für die Referenzspannung (siehe Bild 1) wurde im ersten Prototyp vergessen. Dies ist ein Fehler im Entwurf und verursacht Probleme. Lassen Sie ihn also nicht weg, wenn Sie ein solches Messmikrofon aufbauen wollen. Die „J-Punkte" sind Durchgangslöcher der Platine zum Anlöten von „fliegenden Kabeln". Der BNC-Stecker im mechanischen Gehäuse wird Punkt-zu-Punkt mit dem Vorverstärker verdrahtet. Das positive Kabel des Steckers versorgt U2, den 3,3-V-Regler, mit einer Spannung, die der eingestellten Compliance-Spannung U_{IEPE} entspricht. Der Ausgang des Summenknotens steuert einen weiteren Zener-Regler, der auf etwa 10 VDC eingestellt ist, und erzeugt so die in Bild 2 dargestellte Gesamtspannung.

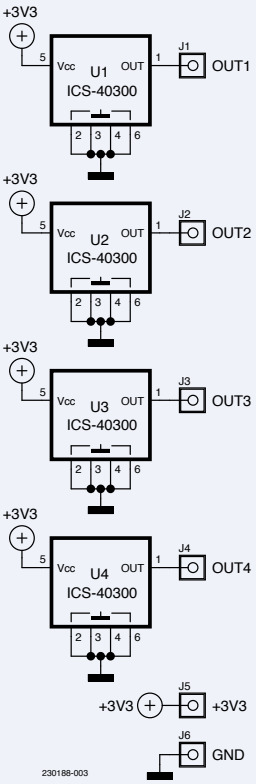


Bild 4. Schaltplan für die kleine, runde MEMS-Platine, auf der die vier Mikrofone untergebracht sind und die über eine Reihe von Durchgangslöchern für die Verdrahtung der Ausgangssignale (zu den Eingängen des Vorverstärkers) sowie für die Stromversorgung und die Masse verfügt. Wie Sie sehen können, gibt es insgesamt sechs „J-Punkte", vier für Ausgangssignale sowie 3,3 V und GND.



Bild 5. Ein aufgebautes Mikrofon, verpackt in einem 3D-gedruckten Gehäuse mit abgenommenem Deckel. Das endgültige Gehäuse ist für ein 0,5"-Mikrofon überdimensioniert, aber recht gut geeignet, um die Funktion des Konzepts schnell nachzuweisen.

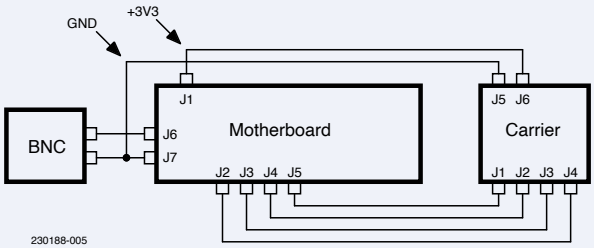


Bild 6. Verdrahtung der hier entworfenen Platinen: Das „Motherboard" ist der Vorverstärker und der „Carrier" trägt die vier Mikrofone.

Strom- und Signalverteilung mit IEPE

Integrated Electronics Piezo-Electric (IEPE) ist ein cleverer Stromversorgungsstandard, der in vielen Datenerfassungssystemen (DAQ) eingesetzt wird. Er löst auf geniale Weise das Problem, über eine Zweidrahtschnittstelle Strom zu liefern und ein Signal zu empfangen. Dies geschieht durch die Nutzung der Eigenschaften einer Konstantstromquelle mit ihrer im Idealfall unendlichen Ausgangsimpedanz. In der Praxis äußert sich dies in einer sehr steilen U-I-Kurve. Das bedeutet, dass die Stromquelle unabhängig von der anliegenden Spannung einen Strom zur Last (den Vorverstärker und das Mikrofon) schickt. Auf diese Weise kann der Vorverstärker die so genannte Compliance-Spannung modulieren und es fließt immer noch ein konstanter Strom zum Vorverstärker für dessen Versorgungsschienen und zur weiteren Verteilung. **Bild 2** zeigt ein Beispiel für eine Wellenform in einem IEPE-basierten System.

Da National Instruments in der Akustikforschung weit verbreitet ist und die IEPE-Quellen alle ähnlich sind, wurde das Schall- und Schwingungsmessgerät USB4431 dieser Firma als geeignetes Referenz-DAQ verwendet. Der 4431 gibt 2,1 mA aus und hat eine Compliance-Spannung von über 20 VDC.

Vorausgesetzt, der DC-Betriebspunkt des Systems liegt innerhalb dieser Grenzen (mit angemessenem Spielraum, damit die maximale Wechselspannung, die durch die Compliance-Gleichspannung beeinflusst wird, die maximalen Betriebsbedingungen nicht überschreitet), sollte die Schaltung funktionieren.

Der konstante Strom von 2,1 mA kann nun für den Entwurf unseres Stromverteilungsschemas verwendet werden. Wegen ihres geringen erforderlichen Kathodenstroms und ihrer einfachen Handhabung werden Zener-Shunt-Regler verwendet. Die Operationsverstärker und MEMS-Mikrofone benötigen den meisten Strom, laut ihren Datenblättern:

I_q = 150 µA und I_q = 250 µA

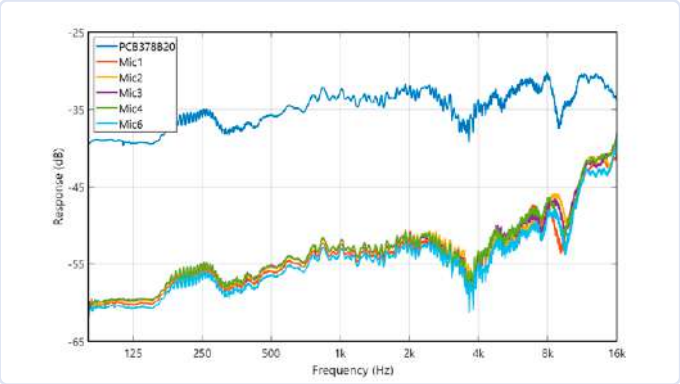


Bild 7. Der Frequenzgang der fünf Mikrofone im Vergleich zu einem Freifeldmikrofon PCB378B20, ermittelt in einer semi-schalltoten Kammer (oberhalb von 200 Hz) . Die allgemeinen Frequenzgang-Verläufe von MEMS-Mikrofonen und dem kommerziellen Mikrofon sind ähnlich. Die meisten der „Schnörkel" sind nicht elektrischer Natur, sondern beruhen eher auf den komplexen akustischen Wechselwirkungen von Reflexionen und unerwünschten „Abprallen" des Schalls vom Mikrofonhalter und anderen harten Oberflächen in der Kammer. Der bemerkenswerteste Unterschied ist der deutliche Anstieg oberhalb 10 kHz bei den MEMS-Elementen, der den Datenblatt-Angaben nahekommt.

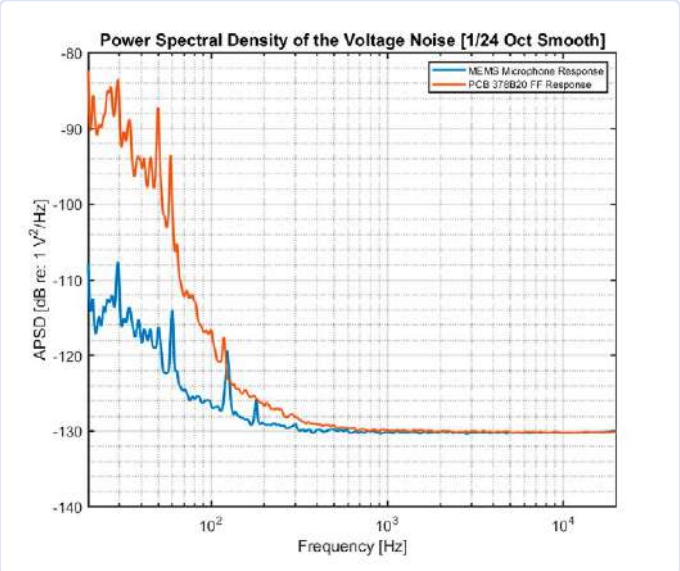


Bild 8. „Rohes" Spannungsrauschen, gemessen in einer semi-schalltoten Kammer ohne Geräusche im Raum und ohne Empfindlichkeitskorrektur. Oberhalb von 1 kHz nähern sich das MEMS-Mikrofon und das handelsübliche Messmikrofon dem Grundrauschen des DAQ an.

Wenn man von fünf Operationsverstärkern und vier MEMs ausgeht, beträgt der gesamte Strombedarf 1,75 mA. Die verbleibenden 350 µA werden zur Versorgung der Shunt-Regler herangezogen. Der Zener-Regler, der die 3,3-V-Schiene erzeugt, hat einen Vorwiderstand, der den Kathodenstrom bestimmt. Als Zener-Referenz wurde der einstellbare TLVH432 gewählt, der mit einem Kathodenstrom von 100 µA arbeiten kann. Der Bias-Spannungsregler U3 benötigt keinen Serienwiderstand zur Einstellung des Kathodenstroms, da er einfach die Differenz zwischen dem von der Schaltung verbrauchten Strom und den 2,1 mA des zugeführten Stroms „absorbiert".
Ein ausführliches Beispiel für alle Berechnungen finden Sie in der umfangreichen Application Note von Analog Devices [4]. Sollten aufgrund von Lieferengpässen die Beschaffung von oft benötigten Zener-Referenzen problematisch sein, kann man auch eine erdfreie Spannungsreferenz mit zwei Widerständen und einem NPN-BJT 2N2222A verwenden (siehe das **passende Produkt** „741SE, der diskrete 741-Opamp").

Zusammenbau

Zukünftige Arbeiten an dem Projekt umfassen die Überarbeitung des mechanischen Gehäuses, um es robuster zu gestalten. Der Zusammenbau gestaltete sich recht schwierig, da mehrere kleine (grenzwertig dünne) Teile mit einer 0,4-mm-Düse des Druckers hergestellt werden mussten. Die beste Lösung ist wahrscheinlich ein Mikrofon mit 1 Zoll Nenndurchmesser. Die Platinen sollten durchgängig in einem Flex-Design hergestellt werden, um die Montage zu erleichtern, was aufgrund von Zeitbeschränkungen für den frühen Prototyp nicht möglich war. Die Kombination von Trägerplatine und Vorverstärker auf einer einzigen Platine ohne Punkt-zu-Punkt-Verdrahtung würde das Gerät erheblich vereinfachen und die Montagezeit reduzieren. Die Gesamtkosten für den Bau eines Geräts betrug etwa 30 USD, was angesichts der gemessenen Rauschzahl und des Frequenzgangs sehr wenig ist.

Alle Dateien sind im Hackaday-Beitrag des Projekts zu finden [5].

RG – 230188-02

WEBLINKS

[1] IEPE (Wikipedia): https://de.wikipedia.org/wiki/Integrated_Electronics_Piezo-Electric
[2] D. Self, „Chapter 1: Basics", Small Signal Audio Design, Focal Press, New York, NY, 2015, S. 1-16.: https://amzn.to/43dVyTa
[3] T. B. Gabrielson, „Mechanical-Thermal Noise in Micromachined Acoustic and Vibration Sensors", in IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 40, Nr. 5, S. 903-909, Mai 1993, doi: 10.1109/16.210197: https://ieeexplore.ieee.org/document/210197
[4] Analog Devices, „IEPE-Compatible Interface for Wideband MEMS Accelerometer Sensors", CN-0532, 2020: https://bit.ly/CN-0532
[5] P. Riccardi, „MEMS Based IEPE Powered Instrumentation Microphone", Hackaday.io: https://hackaday.io/project/185762-mems-based-iepe-powered-instrumentation-microphone

Anmerkung des Autors

Ich möchte dem SPRAL-Team der *Pennsylvania State University* für seine Hilfe bei der Durchführung der Messungen in der schalltoten Kammer danken, und ich danke insbesondere Herrn Zane Rusk für seine unermüdliche Unterstützung. Ebenso möchte ich dem *Acoustical Society of America Chapter* der Universität für ihre Unterstützung bei der Fortsetzung des Projekts und der Präsentation der Arbeit danken. PCBway sponserte den Bau von fünf MEMS-Mikrofonen und stellte alle Teile kostenlos zur Verfügung. Ich möchte mich bei PCBway für die Unterstützung des Projekts bedanken, das es Studenten ermöglicht, brauchbare Messmikrofone quasi zum Nulltarif zu entwerfen, zu bauen und zu testen.

Passende Produkte

- **Elektor Audio-Collection (USB-Stick)**
  https://elektor.de/19892
- **741SE, der diskrete 741-Opamp**
  https://elektor.de/the-741se-discrete-741-op-amp

Über den Autor

Peter Riccardi arbeitet derzeit in der Luft- und Raumfahrt als Ingenieur für Avionik (Elektronik). Seine formale Ausbildung ist Maschinenbau, die er 2018 an der Rowan University abgeschlossen hat. Im Jahr 2022 erhielt Peter seinen Master in Akustik von der Pennsylvania State University.
Peter interessiert sich vor allem für Audioelektronik und Elektroakustik; in seiner Forschung schlug er ein lineares Ersatzschaltbild-Transduktionsmodell des Luftbewegungstransformators vor, eines neuartigen elektroakustischen Geräts. Zu seinen persönlichen Projekten gehören kundenspezifische aktive Frequenzweichen mit integrierten Leistungsverstärkern, rauscharme Plattenspieler-Vorverstärker und kundenspezifische Plattenspieler (mechanische Kardanaufhängung, Motortreiber, Gehäuse und so weiter).

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Möchten Sie mehr über MEMS wissen? Sie können den Autor unter pjriccardi@pjroses.co und das Elektor-Team unter redaktion@elektor.de erreichen.

R&S®ESSENTIALS
OSZILLOSKOP DER NEUESTEN GENERATION: EVOLVED FOR MORE CHALLENGES

Präzision leicht gemacht.



NEUES R&S®MXO 5 Oszilloskop

Die R&S®MXO 5 Serie bietet bahnbrechende Oszilloskop-Technologie, mit der Sie das Verständnis und die Prüfung elektronischer Systeme beschleunigen können.

Die Spezifikationen der R&S®MXO 5 Serie, die sowohl Modelle mit vier als auch acht Kanälen umfasst, sind beeindruckend und heben das Messgerät von anderen Branchenlösungen ab.

Darüber hinaus sind die Oszilloskope der R&S®MXO 5 Serie der Inbegriff von Spitzentechnologie, da sie schnelle und genaue Ergebnisse liefern. Mit maßgeschneiderter Technologie und bahnbrechenden Funktionen sind diese Oszilloskope die perfekten Geräte, um das Verhalten von Schaltungen zu verstehen.

Weitere Informationen unter:
www.rohde-schwarz.com/product/mxo5

ROHDE&SCHWARZ
Make ideas real

Werkzeuge zum Ausprobieren, bevor Sie löten



Simulations- und 3D-Modellierungstools, die kostenlos genutzt werden können

Von Stuart Cording (Elektor)

Sie haben eine großartige Idee für eine Schaltung oder ein Produkt, möchten aber noch ein paar grundlegende Ideen testen, bevor Sie den Lötkolben anwärmen oder den 3D-Drucker einschalten? Heute ist es einfacher denn je, herauszufinden, was möglich ist und was wahrscheinlich nicht. Schalten Sie einfach Ihren PC oder Laptop ein und probieren Sie es aus!

Als ich in den späten 1990er Jahren Ingenieurwesen studierte, begann sich neben dem Lötkolben die Macht des PCs als Werkzeug gerade erst zu zeigen. Schaltungen konnten im Textformat beschrieben und mit SPICE über einen DOS-Befehl simuliert werden, wobei blockartige VGA-Diagramme der Signalamplitude und -phase ausgegeben wurden. Ein weiteres, auf Windows basierendes Tool ermöglichte die Simulation digitaler Schaltungen, vorausgesetzt, der Rechner stürzte während der uns zugewiesenen Laborsitzung nicht ab. Außerhalb der universitären Einrichtungen war der Zugang zu solchen Tools jedoch auf zeit- oder funktionsbeschränkte Versionen beschränkt. Wenn man Glück hatte, konnte man während eines Praktikums etwas länger im Büro sitzen und die Entwicklungssoftware nutzen, die der Arbeitgeber zur Verfügung hatte.

Heute hat sich die Einstellung der Branche zur Software deutlich geändert. Es sind viele kostenlose Tools auf dem Markt, die den meisten Makern mehr als genug Möglichkeiten bieten, eine Idee zu testen, bevor sie online die Bauteile bestellen. Andere Tools sind für Maker und nicht-kommerzielle Aktivitäten kostenlos, so dass Sie sich informieren können, ob die Software Ihren Anforderungen entspricht, bevor Sie den Sprung wagen und für eine Lizenz bezahlen. Und dank der Leistungsfähigkeit moderner Webbrowser muss für etliche Tools nicht einmal eine Software heruntergeladen und installiert werden. Loggen Sie sich einfach ein und legen Sie los!

Wokwi

Wenn man das Online-Tool Wokwi [1] aufruft, ist es zunächst etwas unklar, ob eine Website ein Werkzeug mit ausreichender Leistung anbieten kann, um von Nutzen zu sein. Aber, wie wir Ingenieure wissen, kann der Schein trügen. Hinter dem einfachen Einstieg verbirgt sich eine Fülle von Hardware und Software, die es ermöglicht, komplexe Anwendungen auf der Hardwaregrundlage von Arduino, Raspberry Pi Pico, STM32 und ESP32 zu simulieren. Der Zugang zu den Funktionen von Wokwi ist kostenlos, allerdings sind alle Projekte, die Sie erstellen, öffentlich. Für mehr Privatsphäre und Zugriff auf erweiterte Funktionen gibt es den preisgünstigen „Wokwi Club“. Die Projekte beginnen mit der Auswahl eines Mikrocontroller-Boards, und dann werden die Benutzer aufgefordert, eines der vielen vorhandenen Projekte als Ausgangspunkt zu erkunden.

Der Browser ist zweigeteilt, wobei die linke Seite der traditionellen Code-Entwicklung für das ausgewählte Board vorbehalten ist, während die rechte Seite eine visuelle Darstellung der Hardware bietet (**Bild 1**). Es gibt eine Reihe von Teilen in der Bibliothek, von einfachen passiven Bauteilen und Logikelementen bis hin zu kompletten Modulen von SparkFun, Siebensegment-LEDs, LCDs, Servos und IR-Fernbedie-

nungen und -Empfängern. Sie können sogar eine Debugging-Sitzung starten, wenn Sie mit dem Quellcode-Debugger GDB [2] vertraut sind. Ansonsten klicken Sie einfach auf die „Play"-Botton, um Ihren Code auszuführen und Ihre Hardware zu simulieren. Die Anzeigen werden aktualisiert, die LEDs blinken und die Töne ertönen, ganz wie im echten Leben, so dass Sie alles auf Herz und Nieren prüfen können.
Die Umgebung ist gut dokumentiert [3], es gibt einen Blog mit Tipps, und sie wird durch einen aktiven Discord-Kanal unterstützt. Arduino-Projekte werden im .ino-Format gespeichert, so dass sie problemlos in die Arduino-IDE kopiert werden können, und es gibt auch einen Bibliotheksmanager. Die Schaltpläne werden im einfach zu lesenden JSON-Format gespeichert. Um Ihr Projekt zu dokumentieren und anderen die Möglichkeit zu geben, von Ihren Erfahrungen zu profitieren, können Sie Notizen im Markdown-Format in eine readme.md-Datei schreiben. Es wird auch daran gearbeitet, das Tool über die beliebte *Microsoft Visual Studio Code IDE* zu unterstützen und eine Cloud-basierte Continuous-Integration-Umgebung (CI) zur Automatisierung von Tests anzubieten.

Starten Sie mit einer/m

- Arduino-Wecker mit Echtzeituhr-Modul: https://tinyurl.com/alrmclkino
- ESP32 MQTT-Wetterlogger in MicroPython: https://tinyurl.com/espmqttwl
- Raspberry Pi Pico Matrix-Tastatur mit LEDs: https://tinyurl.com/picokeypad

QSPICE

SPICE, **S**imulation **P**rogram with **I**ntegrated **C**ircuit **E**mphasis (Simulationsprogramm mit Schwerpunkt auf integrierten Schaltungen), ist ein Tool, das in den 1970er Jahren in Berkeley an der University of California entwickelt wurde. Es half Ingenieuren, ihre analogen Schaltungen zu simulieren, bevor sie sie mit Hilfe komplexer mathematischer Analysen in Silizium umsetzten, und nutzte dabei die Möglichkeiten der FORTRAN-Sprache für numerische Berechnungen. Heute gibt es SPICE-Varianten als eigenständige Tools oder versteckt im Backend von Schaltungsdesign-Paketen.
Jetzt gibt es eine neue Version. QSPICE [4] wurde von Qorvo auf den Markt gebracht, einem amerikanischen Halbleiterunternehmen, das sein Portfolio um Leistungsbauteile erweitert und vor kurzem durch die Übernahme von UnitedSiC im Jahr 2021 Siliziumkarbid-Produkte (SiC) in sein Angebot aufgenommen hat. Das Simulationswerkzeug wurde von Mike Engelhardt entwickelt, dem Autor des von Analog Devices (früher Linear Technology) vertriebenen LTspice-Tools.
Oberflächlich betrachtet sieht QSPICE wie jedes andere Simulationswerkzeug aus und bietet einen Arbeitsbereich zum Zeichnen von Schaltungen (**Bild 2**) und zum Starten einer Simulation, wobei die Ergebnisse im Zeitbereich angezeigt werden (**Bild 3**). Im Vergleich zu LTspice folgt die Art der Interaktion jedoch den Standardregeln der Windows-Benutzeroberfläche, zum Beispiel das Vorwärtsschieben des Mausrads, um die Ansicht zu vergrößern. Doch damit endet die Ähnlichkeit auch schon. In einem Interview erklärte Engelhardt, dass er diese Version von SPICE schon vor 25 Jahren entwickelt hätte, wenn er gewusst hätte, was er heute weiß. Die vielleicht bedeutendste Änderung ist die Unterstützung der Mixed-Mode-Simulation mit einem Compiler für Verilog (der in einer C++-Datei geschrieben wird - siehe die unten

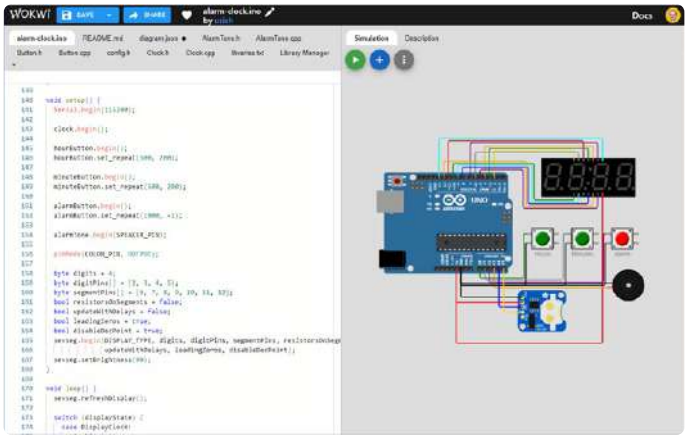


Bild 1. Die Benutzeroberfläche von Wokwi ist einfach gehalten, so dass Sie sich auf den Code (links) und die Schaltung (rechts) konzentrieren können.

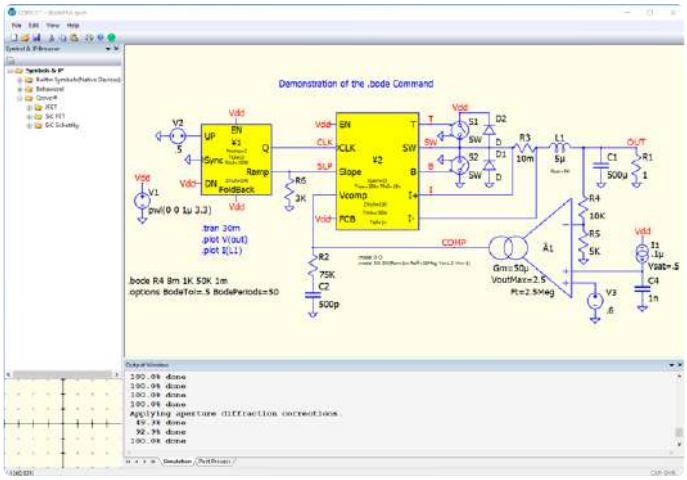


Bild 2. QSPICE bietet eine vertraute Oberfläche für den Schaltungsentwurf, während die GPU Ihres PCs die Simulationsleistung steigert.

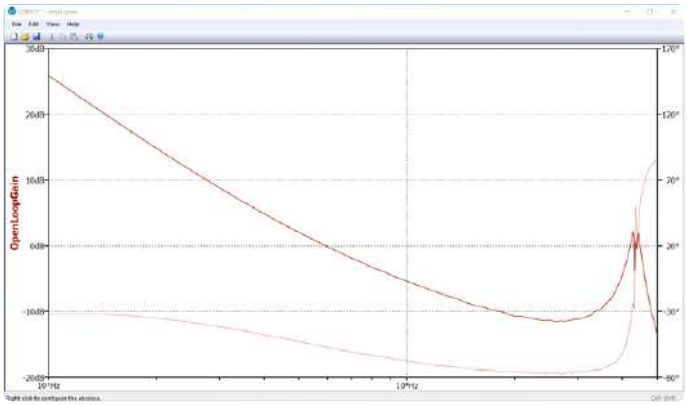


Bild 3. Die Simulationsausgabe, hier ein Bode-Plot, ist vertraut, aber besitzt eine höhere Auflösung als andere SPICE-Tools.

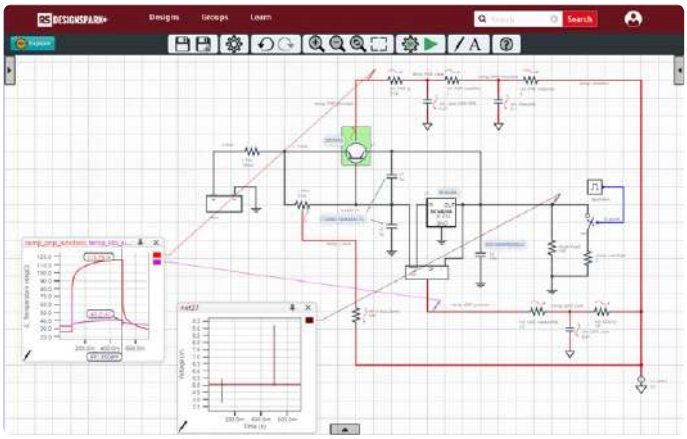


Bild 4. Thermische Aspekte einer Schaltung können auch mit dem Circuit Simulator von DesignSpark, einem Online-Tool, simuliert werden.

aufgeführte VerilogCounter-Demo), die die Implementierung digitaler Geräte ermöglicht. Er erklärt auch, dass dieses Tool im Gegensatz zu anderen SPICE-Tools die gegebene Schaltung simuliert, anstatt die komplexen Gleichungen so gut wie möglich zu lösen.
QSPICE nutzt auch die neuesten Funktionen des Windows-Betriebssystems, die über eine standardisierte Software-API einen vereinfachten Zugriff auf die GPU des Computers ermöglichen. Dies bedeutet, dass während der Simulation die Wellenform-Daten nun wie dargestellt verwendet werden können, ohne dass eine Komprimierung (mit den damit verbundenen Artefakten) erforderlich wäre. Außerdem wird die Grafik sowohl bei der Darstellung von Schaltungen als auch von Simulationsergebnissen deutlich verbessert. Ein weiterer Vorteil ist die Geschwindigkeit, die sich bei Benchmark-Prüfungen als schneller erwiesen hat und auch alle Tests bestanden hat - eine Simulationsfehlerrate von etwa 15 % ist typisch für solche Tools.
Eine bedeutende Simulationsverbesserung betrifft die Sättigung von Bauteilen wie SiC-JFETs und Galliumnitrid-Schaltern (GaN) im eingeschalteten Zustand. Qorvo hofft, dass dies den Ingenieuren bei der Entwicklung von fortschrittlichen Power-Management-Systemen der nächsten Generation helfen wird. QSPICE soll sich zu einem Industrie-Tool entwickeln, zu dem auch andere Halbleiterhersteller beitragen. Derzeit werden rund 1.000 Bauteile und 20 Beispielschaltungen unterstützt.

Start: Gehen Sie zum Menü und wählen Sie *File -> Open Demo...* und dann:

- versuchen Sie die digitale Simulation eines Zählers mit *VerilogCounter.qsch*
- untersuchen Sie ein resonantes Schaltnetzteil (SMPS) mit *SMPS.qsch*
- erstellen Sie ein Bode-Plot mit *BodePlot.qsch*

Schaltungssimulator DesignSpark

DesignSpark von RS Components gibt es seit mehr als einem Jahrzehnt und hat sich zu einer Community entwickelt, die Ingenieuren und Makern zur Seite steht. Unterstützt werden sie durch eine Reihe kostenloser PCB-Design- und 3D-Modellierungs-Tools sowie durch Abonnements, die den Zugang zu erweiterten Funktionen ermöglichen. Neu in dieser Tool-Liste ist der Circuit Simulator [5], ein browserbasiertes Tool von Siemens PartQuest Explore. Es unterstützt analoge, digitale und Mixed-Signal-Schaltungen, aber der vielleicht aufregendste Aspekt dieses Angebots ist seine Multi-Domain-Simulation.
Die meisten Schaltungssimulatoren simulieren entsprechend der vorgegebenen Schaltung. Sie können problemlos mehrere Ampere durch eine Kleinsignaldiode leiten, ohne zu bedenken, dass diese in der ersten Sekunde des realen Betriebs in Rauch aufgehen würde. Mehrbereichssimulation dagegen bedeutet, dass auch elektrothermische und elektromechanische Simulationen möglich sind.
Dies lässt sich am einfachsten anhand einer der verfügbaren Beispielschaltungen erklären. Das Projekt Strom-Aufwärtsregler mit einem NCV4264 LDO von Onsemi erzeugt am Ausgang 5 V an einer 100-Ω-Last. Eine zusätzliche Testschaltung schaltet eine 2-Ω-Last ein und aus, wodurch ein erwarteter Abfall und eine Spitze in der Ausgangsspannung entsteht. Um die Schaltung herum wird ein zusätzliches Wärmediagramm (**Bild 4**) erzeugt, das aus der von einem Transistor erzeugten Wärme und einem Element für den Strom-/Wärmefluss besteht, das zweipolige elektrische Komponenten wie den LDO umschließt.
Natürlich erfordert eine solche Simulation ein Verständnis der thermischen Eigenschaften der Schaltung, wenn sie aufgebaut ist, zum Beispiel die Wärmeübertragung durch die Platine, womit nicht jeder Erfahrung hat. Das Tool enthält eine Reihe von thermischen und elektrothermischen Komponenten wie Transistoren und Dioden mit elektrothermischen Schnittstellen, ein thermisches Cauer-Netzwerk und einen thermoelektrischen Peltier-Kühler.
Ebenfalls enthalten sind magnetische und elektromechanische Komponenten wie Elektromagnete, lineare Gleich- und Drehstrommotoren. Bei Bedarf können neue Komponenten zu Ihrer Bibliothek hinzugefügt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, die wesentlichen Details aus dem Datenblatt des Bauteils einzugeben; ansonsten können sie mit SPICE oder VHDL-AMS [6] beschrieben werden.
Wie bei allen Tools von Design Spark ist für den Zugriff auf den Circuit Simulator eine Registrierung erforderlich, und mit dem kostenlosen Explorer-Plan ist die Simulation auf eine Minute begrenzt. Ein Upgrade erhöht diese Zeitspanne auf 60 Minuten. Eine weitere clevere Funktion ist die Möglichkeit, Ihr Design in Ihre eigene Website einzubetten, so dass Besucher Ihr Design erkunden können, indem sie Wellenform-Tastköpfe bewegen und die Simulationsergebnisse erhalten.

Start: Erstellen Sie ein Konto, melden Sie sich an und probieren Sie

- eine Schrittmotor-Steuerung mit offenem Regelkreis: https://tinyurl.com/pqolstct
- ein elektrisches Servolenkungssystem mit einem PMSM-Motor: https://tinyurl.com/pqpowerst
- eine hydraulische Hebebühne auf der Grundlage einer Drehstrommotorpumpe: https://tinyurl.com/pqcarlift

Shapr3D

Als 3D-Drucker aufkamen, wurden Tools benötigt, um die 3D-Objekte zu entwerfen. Ein beliebtes Tool war SketchUp [7] von einem von Google aufgekauften Software-Startup, mit dem Gebäude zu Google Earth hinzugefügt werden konnten. Zwei Jahrzehnte später ist die kostenlose Version von SketchUp nur noch als browserbasiertes Tool verfügbar, fühlt sich klobig an und sieht nicht so aus, als hätte es sich großartig verändert.

Das Problem mit 3D-Tools ist, dass sie auf den 2D-Monitoren, die den meisten von uns zur Verfügung stehen, nur schwer zu verwenden sind. Das ist aber etwas, das Shapr3D [8] mit Bravour meistert. Die Software ist als App für Windows oder Mac oder über den App Store für das iPad erhältlich und kann nach einer Registrierung heruntergeladen werden. Die Benutzeroberfläche macht es einfach zu verstehen, welche 3D-Zeichenoptionen aktuell verfügbar sind. Der Clou ist jedoch, dass Sie jederzeit durch Drücken der Leertaste nahtlos in einen 2D-Zeichenmodus wechseln können, wodurch die Verwirrung vermieden wird, die oft beim Arbeiten mit perspektivischem Rendering entsteht. Wenn Sie also mit dem technischen Zeichnen auf Papier vertraut sind, haben Sie einen guten Ausgangspunkt.

Sie werden ebenso zufrieden sein, wenn Sie es vorziehen, direkt mit einer 3D-Zeichnung zu beginnen (**Bild 5**). Maße und Winkel lassen sich leicht ändern, nachdem ein Objekt gezeichnet oder eine Fläche gezogen wurde, ebenso wie Verrundungen oder Fasen. Kreise werden mit dem Konzentrisch-Werkzeug mittig platziert, auch wenn nur ein Bogen als Bezugslinie zur Verfügung steht. Und um die Genauigkeit zu gewährleisten, lassen sich das Raster und das Einrasten darauf leicht an die Anforderungen Ihres Entwurfs anpassen.

Shapr3D ermöglicht auch das Ausprobieren seiner erweiterten Funktionen. So kann beispielsweise ein vorhandenes 3D-Modell in eine mechanische Zeichnung umgewandelt werden, oder es können „Materialien" auf die Oberfläche aufgetragen werden, um ein Gefühl für das Aussehen des Endprodukts zu bekommen (**Bild 6**). Mit der kostenlosen Version können Modelle als STL- oder 3MF-Dateien für den 3D-Druck exportiert werden, wobei die Auflösung auf die niedrige Einstellung beschränkt ist. Ansonsten werden Ihre Dateien in der Cloud gespeichert.

Zum Testen haben wir eine einfache Halterung im STEP-Dateiformat [9] von GrabCad [10] heruntergeladen, das eine Reihe von Modellen in seiner Bibliothek anbietet.

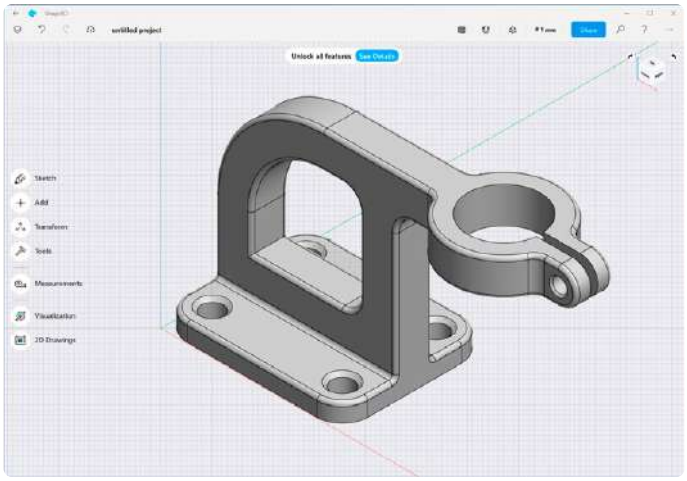


Bild 5. Die Benutzeroberfläche von Shapr3D ist sehr intuitiv und unterstützt einen nahtlosen Übergang zwischen 3D- und 2D-Zeichnung.

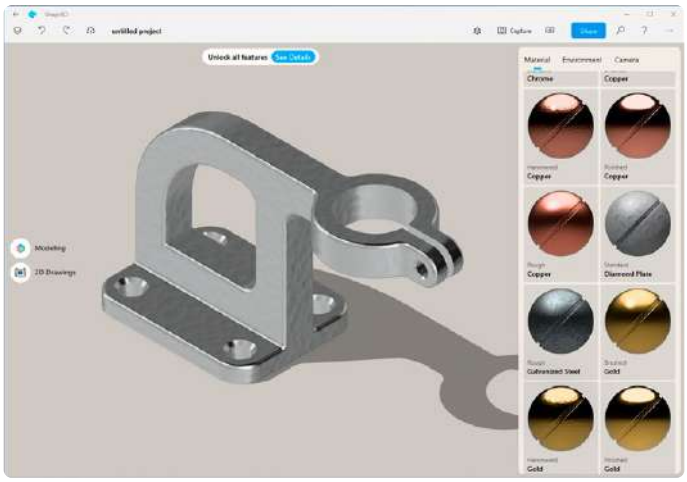


Bild 6. Auf fertige 3D-Modelle können Materialien angewendet werden. In der kostenlosen Version werden die ausgewählten Materialien nicht gespeichert.

Erst ausprobieren, dann bauen

Bob Pease, der berüchtigte Analog Staff Engineer von National Semiconductor behauptete immer, dass seine bevorzugte Programmiersprache das Löten sei. Und er hat Recht - etwas zu bauen ist immer besser und macht mehr Spaß als es zu simulieren. Wenn Sie jedoch keine Bauteile zur Hand haben oder eine Idee auf ihre Durchführbarkeit prüfen möchten, können Sie alle hier aufgeführten Tools kostenlos nutzen, bevor Sie Ihre Bauteilbestellung aufgeben.

RG – 230512-02

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Senden Sie eine E-Mail an den Autor unter stuart.cording@elektor.com oder kontaktieren Sie Elektor unter redaktion@elektor.de.

Über den Autor

Stuart Cording ist ein Ingenieur und Journalist mit mehr als 25 Jahren Erfahrung in der Elektronikindustrie. Viele seiner aktuellen Elektor-Artikel finden Sie unter www.elektormagazine.com/cording. Er schreibt nicht nur für Elektor, sondern moderiert auch den monatlichen Livestream Elektor Engineering Insights. *www.elektormagazine.com/eei*

WEBLINKS

[1] Wokwi: https://wokwi.com
[2] Debugger-Projekt GDB : https://sourceware.org/gdb
[3] Wokwi-Documentation: https://docs.wokwi.com
[4] Qorvo QSPICE: https://tinyurl.com/qspicesimulator
[5] Schaltungssimulator DesignSpark: https://tinyurl.com/designsparkcs
[6] Wikipedia-Eintrag zu VHDL-AMS : https://tinyurl.com/wikivhdlams
[7] SketchUp: https://sketchup.com
[8] Shapr3D: https://shapr3d.com
[9] 3D-Beispielmodell einer Halterung: https://tinyurl.com/bracketmount
[10] GrabCAD: https://grabcad.com

Neue Tools von Microchip!

PICkit 5 und MPLAB ICD 5 jetzt erhältlich

Von Tam Hanna, für Microchip

Im Gegensatz zu früher benutzt kaum ein Elektroniker mehr Eigenbau-Brenner zur Programmierung von PIC-Controllern. Mit dem PICkit steht ein kostengünstiges Tool vom Hersteller zur Verfügung, das überdies mit vielen weiteren Controllerfamilien kompatibel ist. Für die professionelle Fehlersuche steht überdies der mächtige ICD-Debugger zur Verfügung. Vor wenigen Wochen hat Microchip beide Geräte nutzwertgesteigert - in diesem Artikel wird ein wenig mit dem neuen Funktionen experimentiert und gezeigt, wie sich die neuen Versionen in schon vorhandene Infrastruktur einbinden.

Jetzt mit USB-C!

Microchip ist seit jeher bemüht, den „Kampf um das Kabel" in Häusern von MPLAB-Entwicklern so weit wie möglich zu entschärfen. Das ICD 3 nutzte einen Stecker vom Typ USB-A, während das PICkit 4 einen Micro-USB-Stecker mitbrachte.

Die Standardisierung im Bereich der USB-Stecker führt nun dazu, dass sowohl PICkit 5 [1] als auch ICD 5 [2] einen der in so gut wie allen modernen Mobiltelefonen verbreiteten USB-C-Stecker mitbringen.

Für den Besitzer der Geräte ergeben sich daraus mehrere Vorteile. Erstens ist es fortan problemlos möglich, die von Telefon und Co. sowieso mitgeführten Kabel „zu recyclen" - dies spart auf Geschäftsreisen Platz und mitunter Geld, weil man USB-C-Kabel ob der weiten Verbreitung im Smartphone-Bereich so gut wie überall ausborgen kann.

Neuerung Nummero zwei betrifft insbesondere Besitzer der „größeren" Programmiergeräte-Variante ICD 5. Da mehr Energie verfügbar ist, ist es dem ICD 5 möglich, der Applikationsschaltung bis zu 1 A zur Verfügung zu stellen. Auf diese Art und Weise erspart man sich in vielen Fällen die Mitnahme eines zweiten Netzgeräts, das die Energie-Versorgung des zu programmierenden DUTs sicherstellt. Das kleinere Gerät ist dabei nach wie vor auf rund 150 mA Strombudget beschränkt - wohl ein Entgegenkommen an die wesentlich kleinere Hardware.

Im Bereich der eigentlichen Programmiergeschwindigkeit gibt es durch USB-C übrigens keine nennenswerten Vorteile - die beiden Programmer arbeiten nach wie vor „nur" mit USB 2.0 High Speed, was in der Praxis aber wegen der kleinen Dateigröße der meisten Mikrocontroller-Images nicht ins Gewicht fallen dürfte. Optimierungen im Bereich der verbauten Hardware erhöhen allerdings die „gefühlte Geschwindigkeit".

Mit der Macht des Power over Ethernet!

Insbesondere in Hochspannungs-Systemen ist „galvanische Trennung" zwischen dem Programmier-PC und dem Device under Test wünschenswert - fragen Sie den Autor nicht, wie man flucht, wenn eine damals teure AMD-K6-Workstation vom DUT „gegrillt" wird. Während USB und Co. grundlegenden Schutz versprechen, ist richtige galvanische Isolation (und räumliche Trennung) über ein Ethernet-Netzwerk der wahrscheinlich beste Weg.

Besitzer des ICD5-finden auf der Rückseite den in **Bild 1** gezeigten Port. Neu an ihm ist nun, dass er auf Wunsch auch über Power over Ethernet die „Gesamtapplikation" versorgt - je nach Konfiguration Ihres Power over Ethernet-Netzwerks kann die Applikationsschaltung dabei mit durchaus erheblichen Strömen versorgt werden.

Freundlicherweise ist MPLAB X auch zur direkten Ansprache des ICD 5 per Ethernet bereit; es ist also nicht notwendig, zusätzlich ein USB-C-Kabel zwischen PC und Programmiergerät zu verdrahten.

Dass diese Konfiguration auch zu Experimenten mit Continuous Integration beziehungsweise Continuous Delivery einlädt, sei angemerkt - allerdings boten „ältere" Varianten des Programmiergeräts im Zusammenspiel mit einem Ethernet-Anschluss und einem 9-V-Steckernetzteil ähnlichen Arbeitskomfort.

Das Steckernetzteil ist in Version 5 übrigens nicht mehr mit von der Partie. Dies weist darauf hin, dass die Stromversorgung (logischerweise) alternativ auch über das erhöhte Strombudget von USB C beziehungsweise USB 3.0-Ports erfolgen kann.

PICkit 5: Im Dienste der Bequemlichkeit...

Die eigentliche Entwicklung eines elektronischen Systems ist in nur allzu vielen Fällen nur der erste Teil einer umfangreichen Wertschöpfungskette. Wer nicht von Anfang an auch an „Design for Manufactu-



Bild 1. Dieser Port ermöglicht das Anschließen per Power over Ethernet.

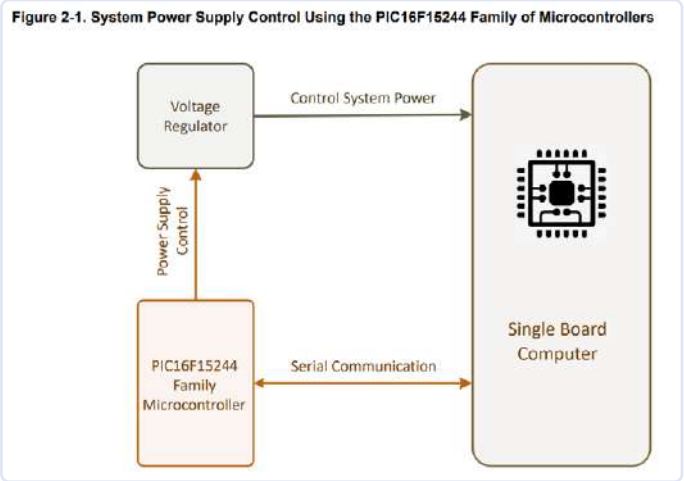


Bild 2. Auch der Management-Mikrocontroller benötigt Firmware! (Bildquelle: [3])



Bild 3. Speicherkarten-Slot.

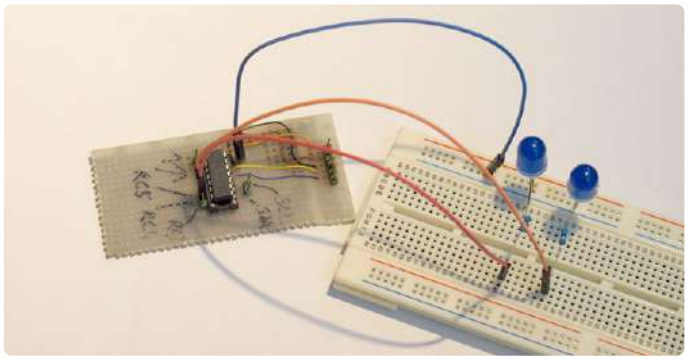


Bild 4. Dieses Board dient als Testsystem.

ring" denkt, hat im Rahmen der Fertigung oft unerwartet hohe Kosten und / oder Ärger.

Ein gutes Beispiel hierfür wären Systeme, die nach dem vom Autor in der Application Note AN4121 [3] beschriebenen und in **Bild 2** zusammengefassten Schema einen „Management-Mikrocontroller" mit einem Prozessrechner kombinieren. Wer hier nicht mitdenkt und beispielsweise den Programmierport für den Controller schlecht platziert, erhöht die Fertigungskosten immens.

Während Entwickler nicht damit überfordert sind, die Firmware auf jede einzelne Platine unter Nutzung von MPLAB auszuliefern, ist diese Vorgehensweise spätestens ab einer gewissen Menge von produzierten Geräten unproduktiv - die traurige praktische Erfahrung des Autors lehrt, dass „Hilfswillige" oder die berühmt-berüchtigte Hilfskraft ohne nennenswerte Kenntnisse mit der Bedienung einer IDE wie MPLAB und Co überfordert sind und im besten Fall Fehler macht (und im schlimmsten Fall die Arbeit aufgibt).

Mit dem PICkit 5 und seiner Funktion *Programmer to Go* schafft Microchip hier Abhilfe. Im Prinzip ist diese Funktion dabei schon seit einigen Versionen mit von der Partie - Geheimnis ist der in der **Bild 3** gezeigte MicroSD-Slot, der eine FAT32-formatierte Speicherkarte aufnimmt.

Unter Nutzung von MPLAB kann der Entwickler dann ein automatisiert einzusetzendes Firmware-Image festlegen, das der Programmier-Adapter dann ohne große menschliche Intervention auf angeschlossene Zielgeräte ausliefert.

Neu ist beim PICkit 5 die Möglichkeit, mehr als ein Firmware-Image in den *Programmer To Go*-Speicherbereich zu kopieren. Ein Programmiergerät lässt sich so zur „Parametrisierung beziehungsweise Endfertigung" mehrerer Assemblies einspannen. Da die eigentliche Auslösung des Programmiervorgangs nach wie vor über den bekannten und unter dem Logo versteckten Taster erfolgt, muss die Auswahl des Images über ein anderes Kommunikations-Interface erfolgen.

...und der Freunde des Bluetooth-Funkstandards

Zur Inbetriebnahme der neuen Programmier-Geräte ist MPLAB in einer Version besser als 6.10 erforderlich - die eigentliche Installation erfolgt so, wie es von MPLAB erwartet wird. Neben der bei Microchip traditionell separat zu erfolgenden Installation des XC8-Compilers ist darauf zu achten, dass Sie MPLAB im Rahmen des ersten Starts in der Windows-Firewall sowohl den Zugriff auf lokale als auch auf entfernte Netzwerke erlauben müssen. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn Sie die größere Version des Programmiergerät unter Nutzung seiner Ethernet-Schnittstelle in Betrieb nehmen wollen.

Im nächsten Schritt ist die Provisionierung einer SD-Karte erforderlich. Der Autor erbeutete ein 16 GB großes Medium aus einem herumliegenden Raspberry Pi und formatierte es unter Ubuntu mit einer FAT32-Partition. Achten Sie dabei auf eine Eigenheit des Disks-Snapins - von Haus aus erzeugt es keine Partition, weshalb eine Extra-Einladung erforderlich ist.

Als Opfer soll der jungfräulichen MPLAB-Installation ein auf dem PIC16F1503 basierendes Board dienen, das der Autor aus einem vergangenen Automotive-Consultingprojekt übrig hatte (siehe **Bild 4**). Entscheiden Sie sich im ersten Schritt wie bekannt für die Option *File → New Project*, um danach ein Projekt für den XC8-Compiler zu generieren. Im nächsten Schritt folgt ein Start von MCC, um ein grundlegendes Projektskelett zu generieren. Der Autor geht in den folgenden Schritten von soliden Grundkenntnissen im Bereich der PIC-Programmierung aus, weshalb das allgemeine Handling nicht weiter besprochen wird.

Windows 7 ist unerwünscht!

Zu beachten ist, dass Microchip explizit davon abrät, die fünfte Version der Programmiergeräte mit Windows 7 zu nutzen - der Autor verwendete deshalb ausschließlich Windows 10 und 11. Im Internet finden sich allerdings einige Berichte, die im Allgemeinen davon berichten, dass es „funktioniert" - zumindest dann, wenn das Programmiergerät regelmäßig Verbindung mit einem Rechner mit Windows 10 oder Windows 11 aufnehmen kann, wo MPLAB im Rahmen einer testweisen Auslieferung eines Kompilats verschiedene Firmware-Upgrades und Housekeeping-Tasks ausführt.

Wichtig ist lediglich, dass zwei der GPIO-Pins als Ausgang deklariert sind. Der Autor wird in den folgenden Schritten die Pins RC4 und RC5 als Ausgänge exponieren, weil sie in der Vergangenheit in einem Kundenprojekt zum Einsatz kamen. Achten Sie danach jedenfalls darauf, den Code zu generieren.

Zwecks einfacherer Unterscheidbarkeit wird der Autor dem hier als *RunMeQuick1* bezeichneten Beispiel-Projektskelett ein nach folgendem Schema aufgebautes Programm einschreiben, dass die beiden

Leuchtdioden langsam, aber gleichzeitig zum Aufleuchten bringen wird:

```
void main(void)
{
    // initialize the device
    SYSTEM_Initialize();

    // When using interrupts, you need to
  // set the Global and Peripheral Interrupt Enable bits
    // Use the following macros to:

    // Enable the Global Interrupts
    //INTERRUPT_GlobalInterruptEnable();

    . . .
    IO_RC4_SetHigh()  ;
    IO_RC5_SetHigh()  ;
    while (1)
    {
            IO_RC4_Toggle()  ;
            IO_RC5_Toggle()  ;
            __delay_ms(1000);
    }
}
```

Im nächsten Schritt öffnen wir die *Project Properties*-Ansicht, wo Sie - wie in **Bild 5** gezeigt - die Einstellungen für die Einrichtung des *Programmer To Go*-Betriebs vorfinden.
Am Wichtigsten ist dabei die Rubrik *Image Name* - dabei handelt es sich um den Namen, den MPLAB der herausgeschriebenen Datei zuweist. Die Option *Send image to Tool* weist die IDE dann dazu an, die MicroSD-Speicherkarte des angeschlossenen Programmiergeräts mit dem generierten Image zu beladen.
Das Markieren der Checkbox *Program Device* ist derweil optional – es entscheidet, ob neben der eigentlichen *Programmer to Go*-Funktion auch ein angeschlossener PIC-Mikrocontroller mit dem bereitgestellten Image zu beschreiben ist.
Die Nutzung dieser Option kann beispielsweise dann sinnvoll sein, wenn sie in einem Aufwasch sowohl das *Programmer to Go*-Image aktualisieren möchten als auch ein (eventuelles) Evaluationsboard für einen letzten Rauch-Test mit aktueller Firmware beladen wollen.
Die eigentliche Auslieferung muss dann unbedingt über das in **Bild 6** gezeigte Menü erfolgen, das eine Aktualisierung des *Programmer to Go*-Images befiehlt.

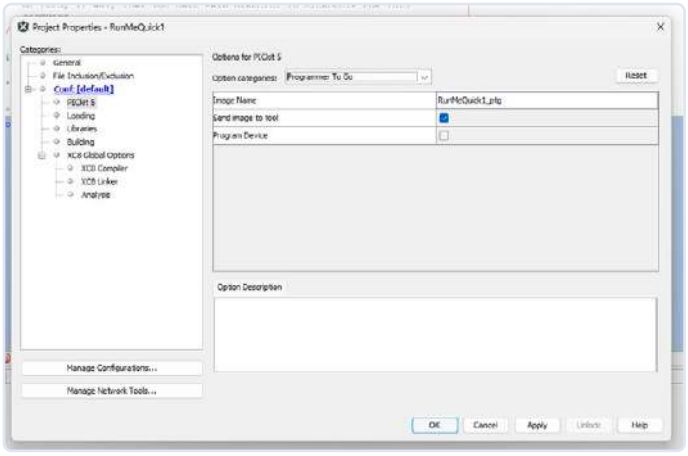


Bild 5. MPLAB unterstützt Entwickler bei der Konfiguration des Programmer to Go-Modus.

Während der Auslieferung kommt es in manchen Fällen zu einem nach Schema `Transmission on endpoint 2 failed (err = -109)` aufgebauten Fehler. In Tests des Autors ließ sich dieser so gut wie immer durch einen Neustart des PCs beheben. Wer sein MPLAB frisch installiert, dem wird an dieser Stelle übrigens ebenfalls zu einem Reboot geraten. Das Deployment ist abgeschlossen, wenn in der Statuskonsole die Meldung `The debug tool is in programmer to go mode` erscheint.
Zur Illustration der Wertsteigerung der zweiten Generation des PICkit 5 kehren wir im nächsten Schritt in die MPLAB-Startpage zurück, wo wir ein weiteres, im Allgemeinen identisches Projekt mit dem Namen *RunMeQuick2* erzeugen. Auch hier gilt, dass ein Start von MCC erforderlich ist. Der für die beiden Signal-LEDs vorgesehene Code sieht nun allerdings folgendermaßen aus:

```
void main(void)
{
    . . .

    IO_RC4_SetLow()  ;
    IO_RC5_SetHigh()  ;
    while (1)
    {
            IO_RC4_Toggle()  ;
            IO_RC5_Toggle()  ;
            __delay_ms(1000);
    }
}
```

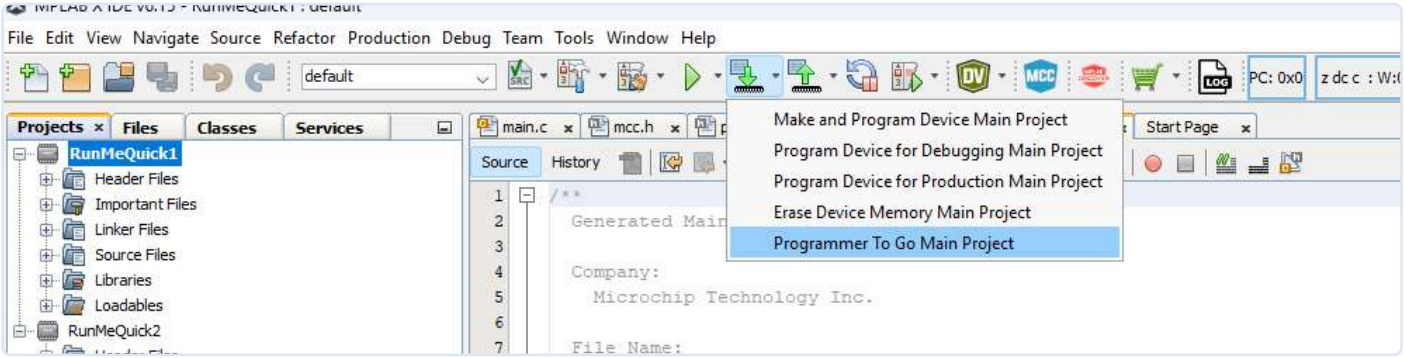


Bild 6. Mit diesem Eintrag wandert das Image auf die SD-Karte.



Bild 7. Diese Applikation erleichtert die Remote-Programmierung.



Bild 8. Das Startmenü....

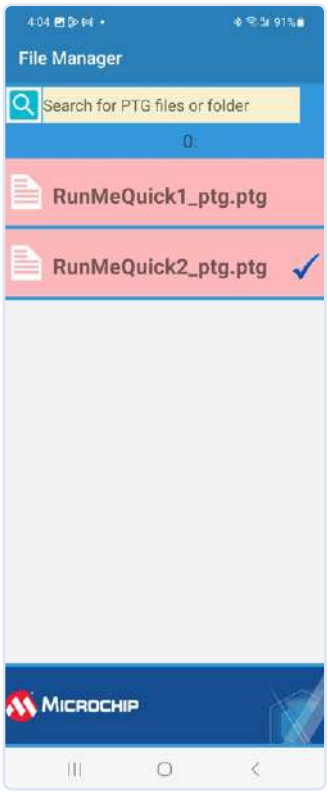


Bild 9. ...und die Auswahl des zu deployenden Images.

Zur Parametrisierung des angeschlossenen PICkit ist dann – logischerweise - eine abermalige Ausführung erforderlich, die ebenfalls mit der Ausgabe der Statusmeldung `The debug tool is in programmer to go mode` abgeschlossen werden muss.
Im nächsten Schritt können Sie den Programmer auch schon von der Workstation trennen. Um das Ganze zu testen, wird der Autor sein PICkit danach mit einem gewöhnlichen Handy-Ladegerät verbinden, das von Experimenten mit einem Chromebook übrig geblieben ist. Die fröhlich hellgrün blinkende Leuchtdiode weist darauf hin, dass das Gerät im *Programmer to Go*-Modus auf Handlungsanweisungen wartet.
Der nächste Akt ist das Öffnen des Play- oder Apple-App-Stores, um die neue und nur mit dem Bluetooth-Modul des PICkit 5 kompatible Steuerungsapplikation herunterzuladen. Der Autor wird in den folgenden Schritten mit seinem Samsung Z Flip arbeiten; die Applikation präsentiert sich im Play Store wie in **Bild 7** gezeigt.
Wegen der Nutzung von Bluetooth LE gilt dabei, dass das Programm im Rahmen des ersten Starts verschiedene Permissions einfordern wird, was aufgrund von Googles Parametern erforderlich und in keiner Weise kritisch oder umgehbar ist.
Im nächsten Schritt erscheint auch schon der Scanning-Dialog, der alle in der Umgebung gefundenen Geräte auflistet. In Tests des Autors war es manches Mal erforderlich, auf den *Cancel*-Knopf zu klicken, bevor die Liste mit den gefundenen Programmiergeräten anklickbar war.
Nach getaner Arbeit präsentiert das System jedenfalls die in **Bild 8** und **Bild 9** gezeigten Bildschirme, die den direkten Einsatz der jeweils gewünschten Firmware auf angeschlossene Zielgeräte erlauben.
Die Handhabung dieser Telefon-Applikation erweist sich nach Ansicht des Autors für Hilfskräfte leichter erlernbar als die Arbeit mit dem oft haarigen *Project Explorer* von MPLAB. Außerdem gilt, dass ein Telefon fast überall zu haben ist und die sonst erforderliche (vergleichsweise leistungsstarke) Workstation entfällt - insbesondere in großen Deployments reduziert dies die Kosten erheblich.

Blick zurück im Dank

Als nächstes Experiment folgt die Rückkehr auf die Windows-10-Workstation, mit der der Autor unter anderem das im Kasten befindliche Lehrbuch realisiert hat. Von Haus aus findet sich dort MPLAB in Version 5.45 - der Autor hat diese Version im kommerziellen Einsatz. Nun bietet sich deshalb der abermalige Besuch der MPLAB-Webseite an, wo wir nun jedoch Version 6.15 herunterladen. Das Installieren der neuen Variante von MPLAB erfolgt dann direkt über die schon vorhandene.
Nach dem erfolgreichen Durchlaufen des Installationsprozesses bot MPLAB 6.15 an, die Einstellungen der Vorgängerversion als Basis für die Parametrisierung der frischen Installation heranzuziehen. Danach war wie immer das Abnicken der diversen Einstellungen der Windows-Firewall erforderlich, die eigentliche IDE startete dann nach dem Herunterladen der *Microchip Offline Help*-Komponente.
Im Rahmen des erstmaligen Starts der IDE erfolgte ein umfangreicher Parsing-Prozess, der unter anderem alle Projektdateien auf den aktuellsten Stand zu bringen suchte. Darüber hinaus wurden die diversen in MPLAB X angelegten Caches aktualisiert, will sagen, mit den in den Projekten befindlichen Informationen bevölkert.
Im nächsten Schritt entschied sich der Autor für das Demo-Beispiel *CH9-Demo1* und verband das aus seinem Lehrbuch bekannte Board mit dem Programmiergerät und dem PC. Die Kompilation verlief erfolgreich; die eigentliche Firmware-Auslieferung scheiterte unter Windows 10 manchmal mit dem von weiter oben bekannten Fehler `Transmission on endpoint 2 failed (err = -109)`. Unterm Strich gilt allerdings, dass die neue Variante des PICkit 5 sich nahtlos in einen schon vorhandenen Entwicklungs-Workflow integriert – dank der Optimierungen erfolgt das Deployment des Codes in vielen Fällen schneller.

Strom messen mit dem ICD5

Microchip erweitert die hauseigene MPLAB-IDE seit einiger Zeit um verschiedene Komfortfunktionen, die Entwicklern unter anderem die Visualisierung von in der Embedded-Applikation anfallenden Mess-und Tracking-Daten erleichtern soll.
Eines der interessanten Features des ICD 5 ist, dass es diese Daten-Visualisierungsengine von MPLAB bei Bedarf mit Informationen über den Stromverbrauch der angeschlossenen Applikationsschaltung ausstatten kann. Im Datenblatt verspricht man dabei eine Genauigkeit von 0,29 µA als Step - weitere Daten zur Genauigkeit des Powermonitors präsentieren sich wie in **Tabelle 1** gezeigt.



Bild 10. Ein kleines Ärgernis bei Nutzung des ICD 5.

Tabelle 1. Genauigkeit des Powermonitors laut Hersteller.

Current and Voltage	Resolution	Full Scale
Current	29 µA / step	1,0 A
Voltage	0,2087 mV / step	6,8 V

Klicken Sie im nächsten Schritt auf *Tools* → *Plug-in Downloads*, und entscheiden Sie sich im daraufhin erscheinenden Fenster für die Option *Microchip Plug-in Manager*. Prüfen Sie sodann, ob der *MPLAB Data Visualizer* schon in der Rubrik *Installed* aufscheint. Normalerweise ist dies bei frischen Installationen der Fall.

Logischerweise müssen Sie die Stromversorgung der Applikationsschaltungen unter Nutzung der im ICD 5 integrierten Energiequelle durchführen. Haarig erweist sich dabei übrigens vor allem der verwendete Stecker: Der Port des ICD 5 ist ein RJ45, während ältere Adapter wie der ICD 3 ein RJ11-Kabel aufweisen. **Bild 10** zeigt, dass der Verbinder zwar im Prinzip passt, aber eine komfortable und sichere Verbindung sieht anders aus.

Die weiter oben für die Arbeit mit dem PICkit realisierten LED-Beispiele taugen naturgemäß auch als Test für den Strom-Messer. Stecken Sie das PICkit ab und verbinden sie das ICD 5, und führen Sie testweise eine abermalige Auslieferung des Programms durch. Der Autor wird in den folgenden Schritten im Interesse der Bequemlichkeit auf ein USB-C-Kabel setzen und die TCP/IP-Features brach liegen lassen.

Im Rahmen der erstmaligen Inbetriebnahme eines ICD muss MPLAB dabei übrigens ein einmaliges Update der Firmware des FPGAs durchführen, was etwas Zeit in Anspruch nimmt.

Interessant ist, dass dieser Prozess oft bei 93% stehen bleibt und danach „wie gewohnt" weiterläuft (**Bild 11**). Warum MPLAB hier nicht das Erreichen eines 100%igen Aktualisierungsstands ausgibt, ist dem Autor nicht ganz klar.

Klicken Sie im nächsten Schritt auf die Option *Window* → *Debugging* → *Data Visualizer*, um den *Data Visualize*-Begrüßungsbildschirm zu starten. Klicken Sie danach in der Rubrik *Power* auf das *Play*-Symbol, um die Datenerfassung loszutreten.

MPLAB reagiert darauf mit der Einblendung des in **Bild 12** gezeigten Fensters, das auf das Fehlen einer festgelegten Visualisierung-Form hinweist.

Das Anklicken der *Plot Raw*-Funktion führt dann dazu, dass ein Diagramm aufscheint. Wer das mit beiden Leuchtdioden alternierend blinkende Programm zur Ausführung bringt, sieht dann, wie in **Bild 13** gezeigt, Informationen über den Stromverbrauch.

Interessantere Ergebnisse lassen sich unter Nutzung von *RunMeQuick1* ertrotzen; dieses Beispiel schaltet beide Leuchtdioden ein und aus (**Bild 14**).

Fazit

Mit PICkit 5 und ICD 5 führt Microchip verschiedene Detail-Verbesserungen durch, die Entwicklern sowohl beim Debuggging als auch bei der Serien-Fertigung unter die Arme greifen. Nach Ansicht des Autors sind die Geräte - die OEMSecrets-Bestpreise betragen zum Zeitpunkt der Drucklegung 86 € beziehungsweise 360 € - für das Gebotene in keiner Weise zu teuer; insbesondere Besitzer des PICkit 4, die sich über die alte Schnittstelle ärgern und ein Kabel weniger mitführen wollen, sollten unbedingt umsteigen. Die Stromanalyse ist ebenfalls sehr wertvoll, und erspart mitunter erhebliche Kosten für eine SMU oder GPIB-Karte.

230571-02

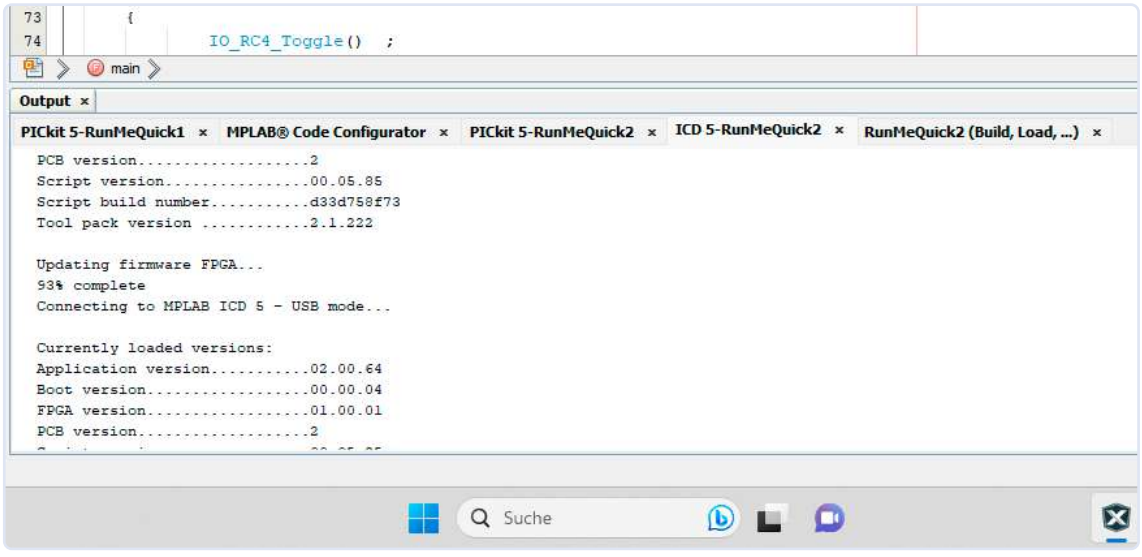


Bild 11. 93 % bedeutet hier den Abschluss der Aufgabe!

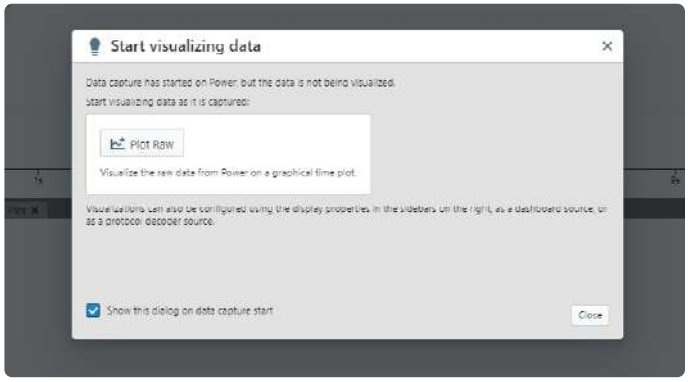


Bild 12. MPLAB bittet um die Festlegung des Visualisierung-Schemas.

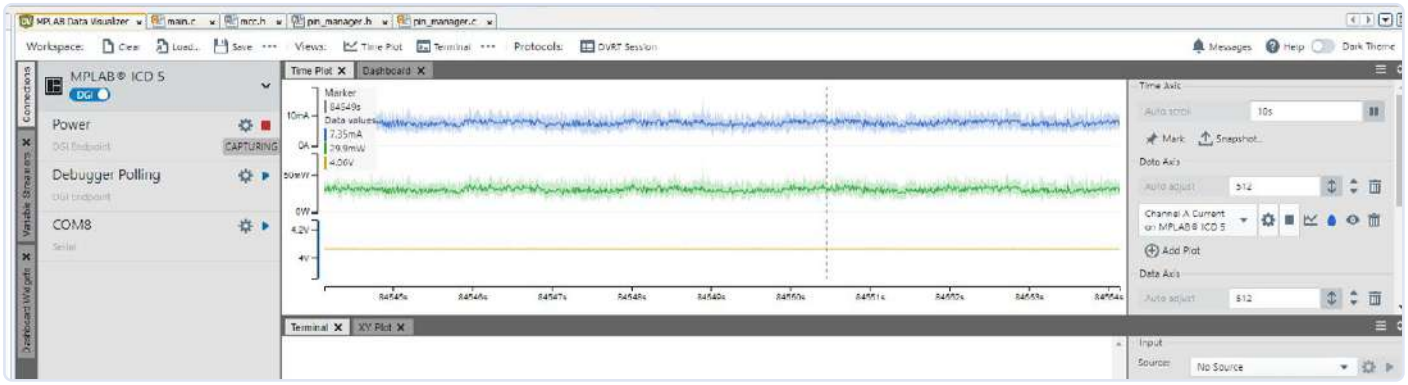


Bild 13. Es ist immer eine Leuchtdiode eingeschaltet.

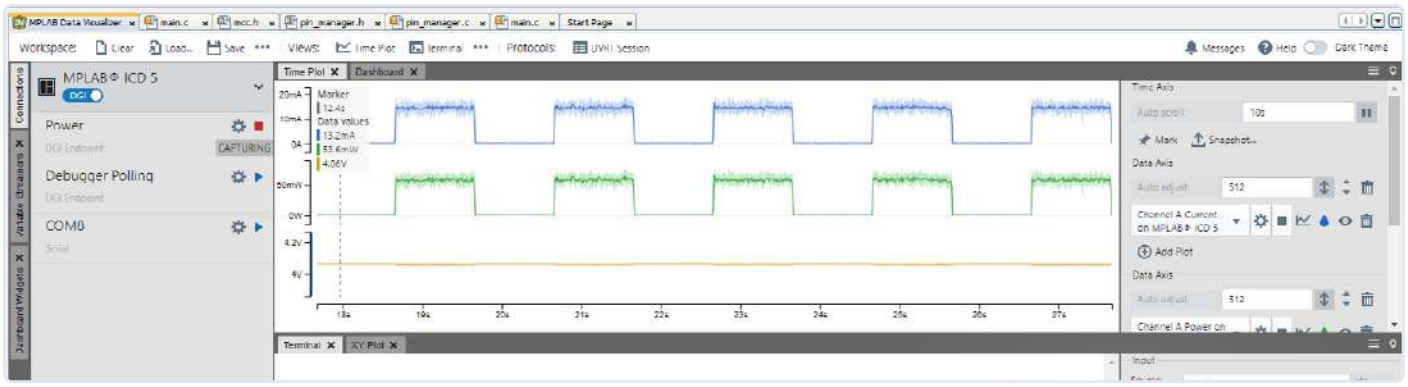


Bild 14. Der wechselnde Stromverbrauch ist klar ersichtlich.

Fordern Sie noch heute Ihren 15%-Rabattcode für diese Tools an!
Geben Sie Ihre Kontaktdaten ein, wählen Sie das Tool aus, für das Sie einen 15%-Rabattgutschein erhalten möchten, und Sie erhalten Ihren persönlichen Gutscheincode, den Sie bei MicrochipDirect einlösen können.

https://page.microchip.com/pic5_icd5



WEBLINKS

[1] MPLAB PICkit 5 von Microchip: https://www.microchip.com/en-us/development-tool/pg164150
[2] MPLAB ICD5 von Microchip: https://www.microchip.com/en-us/development-tool/dv164055
[3] Application Note AN4121: https://www.microchip.com/en-us/application-notes/an4121

Rapid Prototyping von flexibler, dehnbarer Elektronik

Wie Voltera NOVA Innovationen bei tragbaren elektronischen Systemen beschleunigt

Von Stuart Cording, für Voltera

Die meisten Erfahrungen mit Platinen (PCB) macht man mit grünen FR4-Substraten. Durch das Entfernen des überschüssigen Kupfers wird dieser kupferkaschierte Industrieklassiker in das gewünschte Layout gebracht. Entwickler arbeiten aber auch an Systemen, Leiterplatten analog dem 3D-Druck-Verfahren zu drucken. Dies ermöglicht es, das starre FR4 durch flexible, dehnbare Substrate zu ersetzen.



Bild 1. Der Platinendrucker NOVA von Voltera ist mit einem Gewicht von 35 kg ein professionelles Gerät und groß genug, um Substrate bis zu einer Größe von A4 aufzunehmen.

Elektronik hat sich in fast jeden Aspekt unseres Lebens eingeschlichen. Heutzutage ist es schwierig, etwas zu finden, das nicht in irgendeiner Weise auf Elektronik angewiesen ist. Und während herkömmliche Fertigungsmaterialien und Prozesse für Schaltungen auf ihre Bedürfnisse optimiert sind, finden Forscher sie in der Medizinelektronik oft mangelhaft, insbesondere wenn Systeme für das Tragen am Körper konzipiert werden sollen. Menschliche und tierische Körper sind unterschiedlich, wenn sich zum Beispiel die Haut in Bewegung dehnt. Dies muss dann auch in einer elektronischen Applikation entsprechend berücksichtigt werden. Flexible Leiterplatten gibt es schon seit langem, sie verwenden dafür FR4-Platinen, die über Kupfer-Leiterbahnen auf Polyimid, auch unter dem Handelnamen Kapton bekannt, miteinander verbunden sind. Obwohl dadurch zwar Flexibilität gewährleistet ist, dehnt sich das Material aber nicht.

Echte flexible Elektronik ist möglich – aber sie ist in der Herstellung eine besondere Herausforderung und liegt außerhalb des Angebots der meisten Prototyping-Services. So ist beispielsweise thermoplastisches Polyurethan (TPU) sowohl flexibel als auch dehnbar, und Leiter können mit einem Metallabscheidungsverfahren, dem sogenannten Sputtern, aufgebracht werden. Im Vakuum wird die Oberfläche des Materials mit gasförmigen Ionen beschossen, die durch eine hohe Spannung beschleunigt werden. Beim Auftreffen gehen sie eine enge Verbindung mit dem Zielmaterial ein. Diese Methode wird häufig verwendet, um Aluminium oder Legierungen wie Wolfram-Titan oder Aluminium-Kupfer aufzutragen. Ansonsten gibt es noch den Siebdruck, den Sie wahrscheinlich zuletzt in der Schule ausprobiert haben. Wie beim Drucken von Postern oder T-Shirts werden leitfähige Tinten durch eine Maske, die auf ein vorgespanntes Stahl- oder Nylongewebe aufgebracht wird, auf das Substrat aufgetragen, bevor die Tinte erhitzt wird, um sie auszuhärten.

Additiver Ansatz für die Schaltungsherstellung

Solche Lösungen machen den Prototyping-Prozess langsam und/oder teuer und/oder unsauber. Dies ändert sich jedoch dank der Entwicklung von Platinendruckern, die die Entwicklung bei 3D-Druckern für Kunststoff aufgreifen. Mit *Direct Ink Writing* (DIW) verwenden diese Maschinen einen additiven und keinen subtraktiven Ansatz, um leitfähiges Material dort aufzutragen, wo es benötigt wird.

Es gibt zwei Arten von Rapid-Prototyping-Platinendruckern auf dem Markt. Die erste verwendet die Funktion der positiven Verdrängung, ähnlich wie bei einer medizinischen Spritze. Die Tinte wird in den Zylinder gegeben und ein Kolbenkopf aus Kunststoff oder Gummi wird dann dagegen gedrückt. Abgesehen von der Komplexität der Strömungsdynamik von leitfähigen Tinten ist diese Methode relativ zuverlässig. Durch eine bestimmte Verschiebung des Kolbens wird konstant die gleiche Menge an Tinte durch die Düse geleitet. Verstopfungen können als Problem auftreten, aber dies ist eine Herausforderung für jeden Dispenser, der mit thixotropen (nichtnewtonschen) Flüssigkeiten arbeitet, deren Viskosität sich beim Scheren ändert [1]. Darüber hinaus kann sich bei eingeschlossener Luft, wie sie in sich selbst füllenden Zylindern oft auftritt, die Durchflussrate verändern. Eine weitere Herausforderung ist die Lagerung zwischen den Einsätzen. Die Tinte muss möglicherweise gekühlt oder eingefroren werden, obwohl es auch einige Tinten gibt, die bei Raumtemperatur gelagert werden können.

Der zweite Ansatz ist der thermische Tintenstrahldruck, bei dem mit Hilfe von Patronen leitfähige Tinte auf das Zielsubstrat gedruckt wird. Die Technologie kann bei entsprechender Abstimmung fein gedruckte Muster erzielen und sowohl auf starren als auch auf flexiblen Substraten verwendet werden. Geeignete Tinten haben jedoch relativ niedrige Viskositäten, so dass weniger Varianten zur Verfügung stehen. Es gibt dabei auch andere Herausforderungen. Niedrige Tintenviskositäten können dazu führen, dass einige Substrate abperlen oder verlaufen, was zu einer schlechten Haftung führt, es sei denn, es werden spezielle Beschichtungen aufgetragen. Und da ein Großteil der Tinte aus Lösungsmitteln besteht, hinterlassen ausgehärtete Elemente im Druck oft nur wenig leitfähiges Material. Probleme mit der Lötbarkeit und einem höheren Leiterbahnwiderstand als gewünscht können die Folge sein. Ein mehrflutiger Druck könnte dies zwar verhindern, kann sich aber aufgrund von Einstellungsparametern auf die minimale Mustergröße auswirken. Auch das Verstopfen der Düse ist möglich. Tinten destabilisieren sich bei falscher Lagerung und verursachen Verstopfungen durch die Bildung von Agglomeraten. Und selbst, wenn die Lagerungsempfehlungen befolgt werden, härtet die Hitze des thermischen Tintenstrahlverfahrens einen Teil der Tinte in den Düsen aus.

NOVA – eine modulare Dosierplattform

Voltera, das kanadische Scale-up, das vor rund sieben Jahren den V-One [2] auf den Markt gebracht hat, stellt sich den Herausforderungen des Rapid Prototyping von flexiblen Schaltungen. Dieser Drucker zielte in erster Linie auf starre Substrate ab, obwohl die Benutzer damit auch flexible Schaltungen erstellten. Mit dem neuesten Drucker NOVA [3], der Ende letzten Jahres auf den Markt kam, hat sich das Unternehmen voll und ganz auf die Unterstützung flexibler und dehnbarer Elektronik konzentriert (**Bild 1**).

Dank ihres Wissens über den Verdrängungsdruck haben sie die spritzenartigen Dispenser beibehalten. Die Hardware wurde jedoch deutlich aufgerüstet, so beispielsweise die Integration der Druck-Rückkopplungsschleife in den Druckkopf. Außerdem gibt es eine 12-Watt-Heizung, die die Temperatur der Tinte auf einem konstanten Wert hält und so ein gleichmäßigeres Dosierergebnis während des Auftragens gewährleistet. Es ist unglaublich, dass sogar Schwankungen der Klimaanlagen zwischen den Räumen zu unterschiedlichen Dosierungen der Tinten führen können. Auf dem Markt gibt es eine große Vielfalt an Substraten und Tinten. Man versucht dem Benutzer beim Testen von Materialien mit Viskositäten ab 1.000 cps bis 1.000.000 cps (Centipoise) zu unterstützen. Tinten auf Silberbasis wie die Conductor 3 [4] sind leicht erhältlich und sowohl für starre als auch für flexible Anwendungen geeignet. Sie können aber auch selber einen Zylinder mit den leitfähigen Tinten füllen, die sie für Siebdruckelektronik verwenden, um Ihren eigenen Anforderungen gerecht zu werden.



Bild 2. Der Smart Dispenser verfügt über eine integrierte Heizung und eine KI-fähige Durchflusskalibrierung. Die Smart Probe verfügt über eine Rubinspitze zur präzisen Kartierung von Substratoberflächen.

Der Drucker NOVA wiegt 35 Kilogramm, was bedeutet, dass er einen festen und stabilen Standort benötigt. Mit einer Größe von 675 × 605 × 345 mm dürfte er den Großteil ihres Labortisches belagern. An der Vorderseite bietet eine Schublade Platz zum Verstauen von Materialien und Werkzeugen. Im Inneren sorgt eine Schaumstoffeinlage dafür, dass der Druckkopf und die Oberflächensonde zusammen mit den anderen Werkzeugen, die Sie während des Betriebs zur Hand haben müssen, sicher aufbewahrt werden.

Obwohl das Gerät über einen Ethernet-Anschluss verfügt, empfiehlt die Bedienungsanleitung, den mitgelieferten WLAN-Dongle anzuschließen, um damit auf den Drucker zuzugreifen. Anstatt Software zur Installation auf Ihrem PC bereitzustellen, ist dieses Gerät browserbasiert. Das bedeutet, dass Sie unabhängig vom gewählten Betriebssystem und Computerhersteller keine Probleme bei der Bedienung des Druckers haben werden. Darüber hinaus kann in einer Laborumgebung jeder bei Bedarf auf das Gerät zugreifen. Wenn WLAN jedoch nicht Ihr Ding ist, gibt es auch kabelgebundenes Ethernet.

Flexible Substrate an Ort und Stelle halten

Das flexible Substrat wird durch das poröse Titan-Druckbett mit integrierter Vakuumpumpe an Ort und Stelle gehalten. Das Bett ist groß genug, um Substrate bis zur

A4-Größe zu verarbeiten. Diese Befestigungslösung ist besser als Einspannen, da sich das Material während des Drucks nicht wellen kann. Die Aufnahme ist an einem X-Y-Z-Portal befestigt, das zwei Werkzeuge gleichzeitig einspannt. Diese bestehen aus dem Smart-Dispenser und der Smart-Probe (**Bild 2**). Letzteres verfügt über eine rubinbestückte Sonde, die die Oberfläche des Substrats präzise erfasst. Das Anbringen und Abnehmen der Werkzeuge erfolgt über der mechanischen Kupplungs- und Verriegelungshebel. Integrierte LEDs zeigen dem Anwender den Status des Werkzeugs an.

Der Smart-Dispenser verfügt über einen Drucksensor, der durch Rückmeldung im geschlossenen Regelkreis für einen gleichmäßigen Tintenfluss sorgt. Bei den Spritzenzylindern handelt es sich um Standard-Typen mit einem Inhgalt von 5 cm³, die mit 2,5 ml Tinte befüllt werden können. Ersatz gibt es von der Firma Voltera und ihren Partnern. Es können Leiterbahnen bis zu einer Breite von 0,1 mm gedruckt werden. Durch eine richtige Kombination von Düse und Tinte werden Pads für oberflächenmontierbare Bauteile mit einem Rastermaß von 0,4 mm unterstützt. Eine Auswahl an Düsen mit den Maßen von 100 µm, 150 µm und 225 µm ist verfügbar. Dank der Luer-Lock-Spritzenzylinder kann zudem auch jede Standarddüse verwendet werden. Dies stellt sicher, dass eine optimale Kombination für ihre ausgewählte Tinte gefunden werden kann, um die von Ihnen gewünschten Spurabmessungen zu erreichen.

Der bei weitem größte Vorteil des Druckers NOVA ist seine Flexibilität beim Testen von Tinten mit Substraten. Je nach Zusammensetzung kann es sein, dass die Tinte nur für starre Substrate geeignet ist; eine andere kann nur auf flexiblen, aber nicht dehnbaren Materialien verwendet werden. Flexibles Polyimid und dehnbares TPU sind beliebte Materialien, aber Sie müssen auch dafür sorgen, dass die Tinte richtig auf der Oberfläche aufgetragen wird. Es gibt Versuche, die mit porösem Papier experimentieren, wenn allerdings die Tinte in die Poren dringt, besteht die Gefahr, dass sich keine Leiterbahnen bilden. In solchen Fällen können beschichtete Papiere Abhilfe schaffen.



Bild 3. Die Software für den Drucker NOVA ist browserbasiert. Hier sehen wir den KI-gestützten Kalibrierungsprozess in Aktion.

Kameragestützte Kalibrierung

Bevor der Druck beginnt, wird ein KI-fähiger Kalibrierungsprozess ausgeführt (**Bild 3**). Die Muster werden auf eine spezielle, abnehmbare Kalibrierplatte gedruckt und nicht auf das Zielsubstrat, das bereits in das Gerät eingelegt ist. Dadurch wird vermieden, dass das Zielsubstrat als alternatives Kalibrierungsziel vor dem Drucken gereinigt werden muss. In dem Drucker NOVA ist auch eine 8-Megapixel-Kamera eingebaut, die Fotos vom Kalibrierungsdruck aufnimmt. Nach jedem Versuch wird das Bild in der Benutzeroberfläche angezeigt, so dass Sie viel einfacher feststellen können, ob die Dosierung richtig abgestimmt wurde.

Aushärten und Löten

Der nach dem Druck nächste Schritt ist das Aushärten, wofür ein separater Ofen benötigt wird. So wurde beispielsweise die Tinte Conductor 3 für flexible Schaltungen nach folgendem Prinzip verarbeitet: Das Aushärtungsprofil sieht eine fünf Minuten lange Aushärtung bei 90 °C, gefolgt von 120 °C für 20 Minuten vor. Dies ist nur etwas mehr als die Hälfte der Zeit, die für die vorherige Tintengeneration benötigt wurde. Es ist wichtig zu verstehen, dass der Aushärtungsprozess dazu da ist, die Lösungsmittel der Tinte zu verdampfen, so dass die verbleibenden Bindemittelpolymere die leitfähigen Füllstoffpartikel an Ort und Stelle halten. Aus diesem Grund kann sich die Dicke der Leiterbahnen während dieses Vorgangs verringern.

Bei einigen Anwendungen müssen nur die Leiterbahnen auf ein flexibles oder dehnbares Substrat aufgebracht werden, bei anderen müssen jedoch möglicherweise einige Bauteile hinzugefügt werden. Je nach verwendeter Tinte kann es sein, dass Sie die Lötpads vor dem Löten polieren müssen. Darüber hinaus müssen die Löttemperaturen oft niedrig gehalten werden, um sowohl die elektrischen Leiterbahnen als auch das Substrat zu schützen. Zum Beispiel muss die Tinte Conductor 3 nicht poliert werden. Es wird jedoch ein Zinn-Wismut-Silber-Lot (SnBiAg) oder eine Lotpaste benötigt, das mit einer Temperatur der Lötkolbenspitze oder des Reflow-Lötprofils von nur 180 °C klar kommt.

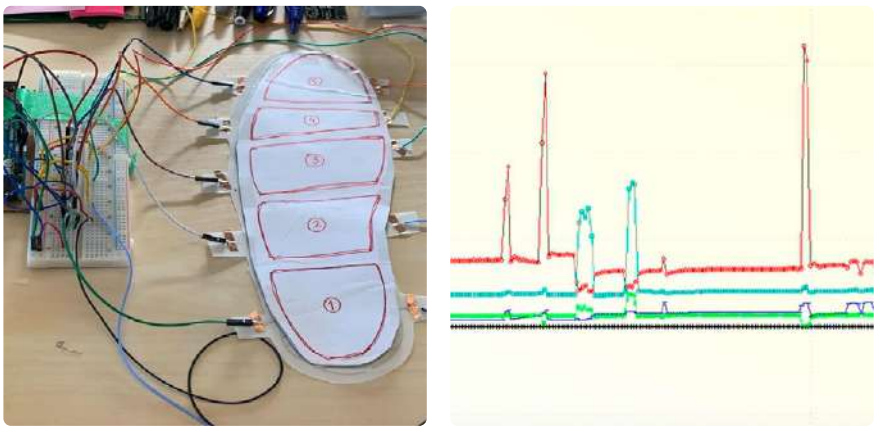


Bild 4. Dieser Schuheinlage-Sohlensensor wurde aus einem TPU-Substrat und dehnbarer Silbertinte hergestellt. Zusammen mit einem Arduino MEGA kann der Druck der Fußsohle gemessen werden.

Andere Methoden zum Befestigen von flexiblen oder dehnbaren Materialien an Ihrer elektronischen Schaltung sind Kompressionsvorrichtungen, leitfähige Klebstoffe oder die Erstellung eines Kabelschwanzes für einen Steckverbinder ohne Kraftaufnahme, der möglicherweise zusätzlich eine Versteifung erfordert.

Erste Versuche mit dehnbaren Leiterplatten

Das Voltera-Team hat hart daran gearbeitet, die optimalen Kombinationen von Substraten und Tinten zu erforschen, indem es tragbare Anwendungen ausprobiert hat. Eines davon war ein Sohlendrucksensor als Einlage für Schuhe, um die Gewichtsverteilung zu messen und Haltungs- und Gangprobleme zu überwachen (**Bild 4**). Für das Prototyp-Design werden die TPU-Folie Intexar und die dehnbare leitfähige Silbertinte Intexar PE874 des Herstellers Celanese verwendet. Der gedruckte Sensor und eine Kohlenstofffolienschicht wurden mit einem Arduino MEGA verbunden, so dass Druckergebnisse grafisch dargestellt werden konnten.

In einem anderen Projekt wurden die gleichen Materialien verwendet, um eine Heizung für die Integration in Kleidung herzustellen (**Bild 5**). Die Heizung wird mit einer T-Shirt-Presse, die üblicherweise zum Aufbringen von Bildern verwendet wird, auf das Tuch laminiert, während ein mechanisches Kompressionsgelenk die Krafteinwirkung auslöste. Dehnbare Substrate können auch mit leitfähiger Tinte bedruckt werden, um Dehnungsmessstreifen zu erstellen. Dieses Konzept wurde in einem Kontrollhandschuh für eine Roboterhand genutzt und zeigte gute Ergebnisse (**Bild 6**). Dickere Leiterbahnen erwiesen sich als noch verlässlicher, während der leitfähige Klebstoff 9400 von MG Chemicals den Anschluss von Drähten an die Sensoren ermöglichte.

Die additive Platinendruck-Technologie ermöglicht es Forschern und Ingenieuren, die Entwicklungszeiten zu verkürzen und ihre Ideen viel schneller zu verbessern. Leitfähige Tinten können sogar verwendet werden, um Fehler in einem PCB-Design zu beheben, indem einfach fehlende oder zusätzliche Leiterbahnen gedruckt und dann ausgehärtet werden. Tragbare Elektronik ist seit langem herausfordernd, denn die wirklich dehnbare Elektronik für den hautnahen Einsatz war nur mit teuren Metallzerstäubungstechniken oder aufwendigen Siebdruckverfahren herstellbar. Mit dem Platinendrucker NOVA von Voltera können Forscher jetzt Innovationen entwickeln und Prototypen in großen und dadurch aussagekräftigen Stückzahlen zu einem Bruchteil der Kosten herstellen.

230633-02



Bild 5. Eine solche flexible Bekleidungsheizung könnte verwendet werden, um die Durchblutung zu fördern, indem sie die Blutgefäße erweitert.



Bild 6. Durch die Nutzung des sich ändernden Widerstands von leitfähiger Tinte auf einem dehnbaren Substrat könnten Dehnungsmessstreifen in den Fingern dieses Handschuhs eine Roboterhand steuern.

WEBLINKS

[1] Über thixotrope Flüssigkeiten: https://ptm-mechatronics.com/en/topics/wiki/thixotropic-liquids
[2] V-One — Ein Desktop-Platinendrucker: https://voltera.io/v-one
[3] NOVA — Eine modulare Dispenser-Plattform: https://voltera.io/nova
[4] Conductor 3 Ink: https://store.voltera.io/products/conductor-3-ink-cartridge-2ml
[5] Elektor Expert Paper: The buyer's guide to PCB printers: https://elektormagazine.com/elektor-pcb-printer

Galvanische Trennung

Phototransistor-Optokoppler erfolgreich einsetzen

Von Eleazar Falco (Würth Elektronik eiSos)

Optokoppler übertragen elektrische Signale auf optischem Wege über eine Isolationsbarriere, so dass sich damit zwei Schaltungsteile galvanisch voneinander trennen lassen. Welche Aspekte spielen bei ihrem Einsatz eine wichtige Rolle und wo liegen ihre Grenzen?

Ein Optokoppler ist ein Bauelement, das ein elektrisches Signal durch optische Kopplung über zwei galvanisch getrennte Schaltkreise übertragen kann. Im Gegensatz zu Transformatoren oder Kondensatoren, die nur Wechselstromsignale über die Isolationsbarriere übertragen können, übertragen Optokoppler gleichermaßen Gleich- und Wechselstromsignale. Dies macht sie sehr beliebt für zahlreiche Anwendungen wie beispielsweise galvanisch getrennte Netzteile und Kommunikationsschnittstellen.

Für das Design einer funktionierenden, robusten und zuverlässigen Anwendung mit Optokopplern ist es unerlässlich, nicht nur die Hauptparameter und parasitären Elemente des Bauelements zu verstehen, sondern auch Schwankungen und die Abhängigkeit von anderen Faktoren wie Temperatur oder Arbeitspunkt. In diesem Zusammenhang sind vor allem das Gleichstrom-Übertragungsverhältnis (englisch: *Current Transfer Ratio*, CTR) und die parasitäre Ausgangskapazität des Optokopplers relevant, die den Betriebsfrequenzbereich und die Schaltleistung begrenzen.

Vor diesem Hintergrund behandelt dieser Artikel die Grundlagen der Funktionsweise der Optokoppler-Familie WL-OCPT [1] mit Phototransistorausgang von Würth Elektronik, einschließlich seiner Parametercharakterisierung für eine gegebene Betriebsbedingung sowie wichtiger Designüberlegungen.

Aufbau und Betrieb

Ein Phototransistor-Optokoppler besteht aus einem Infrarot-Lichtsender (IR-LED, Galliumarsenid (GaAs)) und einem Lichtdetektor (Phototransistor), die beide optisch gekoppelt und typischerweise in einem 4-Pin-Gehäuse gekapselt sind. Diese Baugruppe gibt es in verschiedenen mechanischen Abmessungen und Lötvarianten, um den unterschiedlichen Größen- und Isolationsanforderungen der Zielanwendungen gerecht zu werden. Die WL-OCPT-Serie basiert auf einer koplanaren Doppelgussstruktur, bei der ein Metallrahmen aus Kupferlegierung und eine klare Epoxidharzkuppel als optisches Medium zwischen der IR-LED und dem Phototransistor dienen (**Bild 1**). Ein solcher Aufbau bietet eine mechanisch robuste Isolationsbarriere bei sehr hohen Spannungswerten (zum Beispiel 5 kV) unter gleichzeitiger Beibehaltung eines kompakten Kleinformats.

Das Funktionsprinzip des Optokopplers: Im Emitter findet eine Umwandlung von Strom in ein Lichtsignal statt, da die IR-LED Infrarotstrahlung (das heißt Photonen) mit einer Intensität aussendet, die proportional zum durchfließenden Strom ist. Diese Photonen durchqueren das optische Medium und erreichen nach Reflexion an der Innenfläche der Kuppel den lichtempfindlichen Basis-Kollektor-Bereich des Phototransistors. Hier findet eine Rückwandlung der Lichtenergie in Strom statt: Die Valenzelektronen des Phototransistors „absorbieren" die Photonenenergie und „springen" in das Leitungsband, wodurch – ähnlich wie bei einem herkömmlichen npn-Bipolartransistor – ein Strom zwischen Kollektor und Emitter erzeugt wird. Das Verhältnis zwischen dem Kollektorstrom des Phototransistors (I_C) und dem Strom der IR-LED (I_F) ist der wichtigste Parameter des Optokopplers: das Gleichstrom-Übertragungsverhältnis (CTR). Das elektrische Symbol eines Phototransistor-Optokopplers ist in **Bild 2** dargestellt.

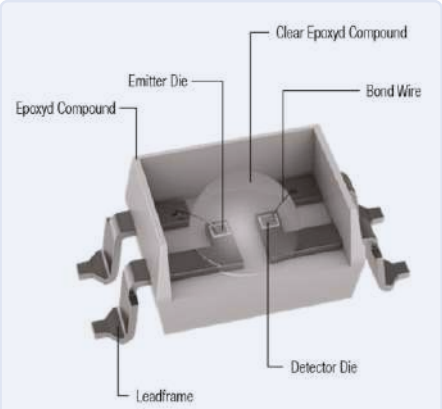


Bild 1. Typischer Aufbau eines Optokopplers der WL-OCPT-Familie.

Gleichstromübertragungsverhältnis (CTR)

CTR ist der Stromverstärkungsparameter des Optokopplers, ausgedrückt als Verhältnis von Kollektorstrom (I_C) zu LED-Strom (I_F) in **Gleichung 1**:

$$CTR = \frac{I_C}{I_F}$$

Es ist zu beachten, dass Gleichung 1 gültig ist, wenn der Phototransistor innerhalb seines aktiven Betriebsbereichs vorgespannt ist. In

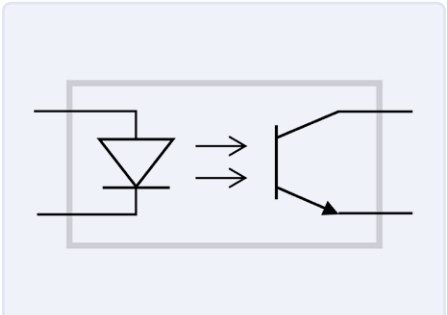


Bild 2. Elektrisches Schaltungssymbol eines Phototransistor-Optokopplers.

Tabelle 1. Beispiel für Optokoppler-Binning auf Basis vom CTR (Baureihe WL-OCPT 816/817 [3]).

CTR-Binning: WL-OCPT-Serien 816 und 817
Prüfbedingungen: I_F = 5 mA, V_{CE} = 5 V, T = 25 °C

Binning	Min.	Max.	Unit
Keine	50	600	%
A	80	160	%
B	130	260	%
C	200	400	%
D	300	600	%

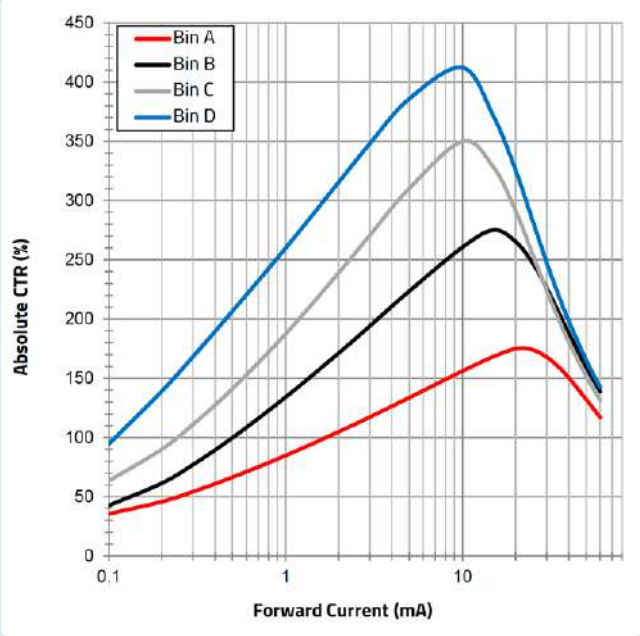


Bild 3. Absolute CTR bezogen auf I_F (bei V_{CE} = 5 V, T=25 °C; WL-OCPT 817 [3]).

Analogie dazu entspricht das CTR dem statischen h_{FE} - oder β-Parameter (Beta) eines Bipolartransistors, während der LED-Strom dessen Basisstrom entsprechen würde. In funktionaler Hinsicht lässt sich der Optokoppler daher als ein npn-Bipolartransistor mit „isolierter Basis" betrachten. Es ist außerdem zu beachten, dass das CTR üblicherweise als Prozentsatz (%) ausgedrückt wird (**Gleichung 2**):

$$CTR(\%) = \frac{I_C}{I_F} \cdot 100$$

Zu den größten Herausforderungen bei der Konstruktion von Optokopplern gehören die große Toleranz und die Schwankungen seines CTR-Werts, die durch verschiedene Faktoren verursacht werden.

CTR-Produktionstoleranz und Binning

Die Beschränkungen, denen die Halbleiterfertigungsverfahren unterliegen, erschweren die Herstellung von Bauteilen mit identischen Eigenschaften und Parameterwerten. IR-LEDs werden auf Wafern mit GaAs-Substrat gezüchtet, bei denen das Erzielen einer vollkommen einheitlichen Halbleiterdotierung und Schichtdicke eine Herausforderung darstellt. Dies führt bei jedem LED-Bauelement auf dem Wafer zu unterschiedlichen Wirkungsgraden bei der Strom-Licht-Wandlung (die Lichtenergie, die von jeder LED bei einem bestimmten Strompegel abgegeben wird, ist also unterschiedlich). Ähnliche Einschränkungen gelten für den Phototransistor, was zu Bauelementen mit unterschiedlicher Lichtempfindlichkeit führt, die bei identischer erhaltener Lichtenergie unterschiedliche Kollektorströme erzeugen. Diese beiden Faktoren wirken sich direkt auf die CTR-Toleranz bei der Produktion aus, aber sie sind nicht die einzigen. So tragen beispielsweise auch Schwankungen bei den Durchlässigkeits- und Reflexionsparametern der klaren Epoxidharzkuppel, die die LED und den Phototransistor optisch miteinander verbindet, zur Erhöhung der CTR-Produktionstoleranz des Bauteils bei.

Da eine zu große Toleranz bei den meisten Designs nicht praktikabel ist, wird das CTR jedes Optokopplers in der Produktion bei einem festgelegten DC-Arbeitspunkt gemessen und das Bauteil auf Grundlage des Wertes im Rahmen eines Binnings klassifiziert. Jedes Binning garantiert einen CTR-Mindest- und -Höchstwert unter den angegebenen Testbedingungen und wird mit einem Zusatzbuchstaben angegeben, wie in **Tabelle 1** für die Serie WL-OCPT 816/817 gezeigt. Zwar wird hierdurch der anfängliche, beim Design zu berücksichtigende Toleranzbereich reduziert, doch hängt der CTR-Wert auch von Betriebsbedingungen wie der Gleichstromvorspannung und der Temperatur ab. Diese Schwankungen müssen ebenfalls berücksichtigt werden.

LED-Strom-bedingte Schwankung des CTR

Der CTR-Bereich innerhalb eines Binnings ist nur für einen gegebenen LED-Strom (I_F) und eine gegebene Kollektor-Emitter-Spannung (V_{CE}) gültig. Bei der WL-OCPT-Serie sind dies 5 mA beziehungsweise 5 V. Bei einem anderen LED-Strom wäre der resultierende CTR-Bereich anders, wie in **Bild 3** zu sehen ist: Hier ist das absolute CTR als Funktion des LED-Stroms eines Musters aus jedem Binning dargestellt (für V_{CE} = 5 V). Es ist zu erkennen, wie das CTR mit dem LED-Strom bis zu einem bestimmten Punkt ansteigt, oberhalb dessen sich das Verhalten umkehrt, also ein weiterer Anstieg des LED-Stroms eine Abnahme des CTR bewirkt. Dies ist auf die nichtlineare Effizienz der Strom-Licht-Wandlung der LED in Verbindung mit der Schwankung bei der Phototransistorverstärkung zurückzuführen.

Es ist festzustellen, dass für I_F = 5 mA das CTR jedes Bauelements erwartungsgemäß innerhalb des Bereichs des entsprechenden Binnings liegt.

Wenn der Phototransistor in den Sättigungsbereich eintritt, ändern sich auch der CTR-Wert und die Kennlinie, wie in **Bild 4** für V_{CE} = 0,4 V gezeigt: Das CTR ist niedriger, und die Kennlinie erreicht ihren Höhepunkt bei einem niedrigeren LED-Strom.

Es ist zu beachten, dass die Kennlinien in Bild 3 und Bild 4 nur einem einzigen Musterteil aus jedem Binning entsprechen. Kennlinien für das relative CTR sind auch auf dem Datenblatt der WL-OCPT-Serie angegeben, wobei das CTR auf den für I_F = 5 mA gemessenen Wert normiert ist. Bei einem LED-Strom von unter 10 mA und bei Betrieb des Phototransistors im aktiven Bereich (V_{CE} = 5 V) liegen alle normierten Kennlinien unabhängig vom Binning sehr nahe beieinander [2]. Da sich die relative CTR-Kennlinie eines Binnings in diesem Bereich praktisch nicht mit dem absoluten CTR-Wert ändert, lässt sich das absolute CTR eines beliebigen Bauelements innerhalb des Binnings mit **Gleichung 3** abschätzen:

$$CTR_{IF} \approx CTR_{rel(IF)} \cdot CTR_{5mA}$$

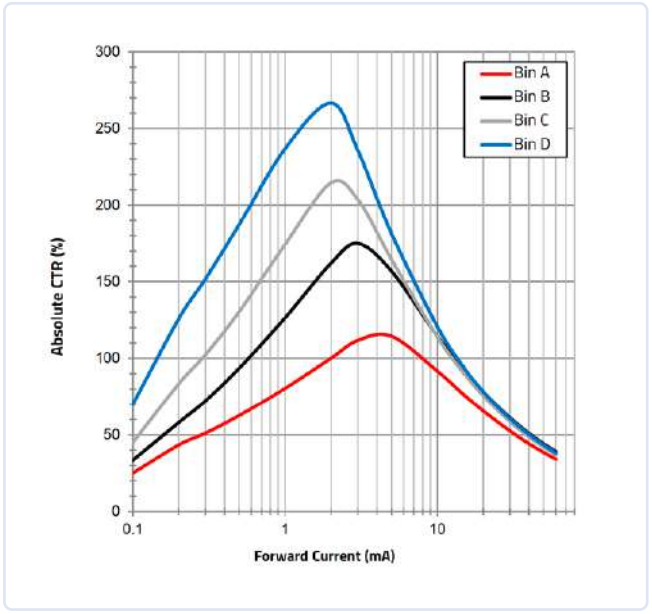


Bild 4. Absolute CTR bezogen auf I_F (bei V_{CE} = 0,4 V, T = 25 °C).

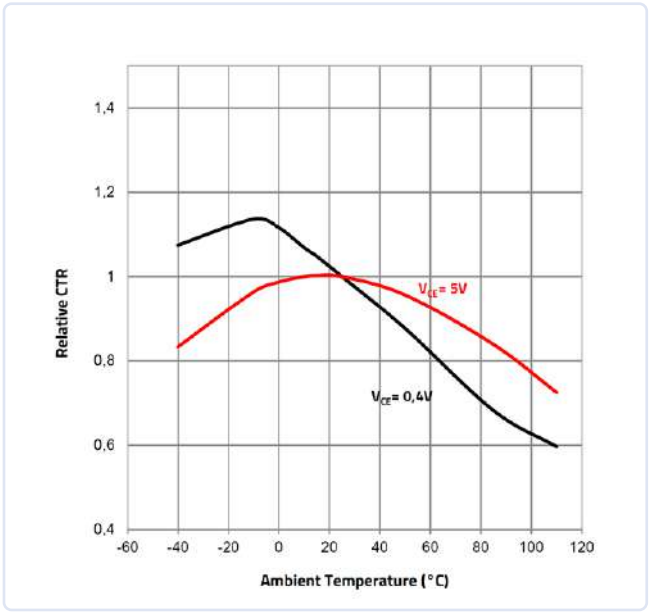


Bild 5. CTR bezogen auf die Temperatur (bei I_F =5 mA).

Beachtenswert ist, dass die relativen Kennlinien oberhalb von 10 mA eine stärkere Abweichung vom absoluten CTR-Wert aufweisen, so dass Gleichung 3 in jenem Bereich weniger genau ist. Wenn der Phototransistor in Sättigung arbeitet, ist die Kurvencharakteristik in gewisser Weise invertiert, und Gleichung 3 ist nur oberhalb von circa 5 mA genau.

Temperaturbedingte Schwankung des CTR

Die Betriebstemperatur des Geräts beeinflusst sowohl den Wirkungsgrad der LED-Emission als auch die Licht-Strom-Verstärkung des Phototransistors und wirkt sich insofern in nicht-linearer Weise auf das CTR des Optokopplers aus – die in **Bild 5** gezeigten Kennlinien zum relativen CTR belegen dies. Beide Kennlinien gelten für alle Binnings und für einen LED-Strom unter etwa 5 mA. Beachten Sie, dass hier die Temperatur der Betriebsumgebung berücksichtigt wird, zu der die Sperrschichttemperatur des Bauelements direkt proportional ist.

Messung der CTR

Das Messen des CTR für die spezifischen DC-Vorspannungsbedingungen der Anwendung ist einfach, wenn die Ströme auf der Grundlage von Gleichung 1 gemessen werden. Dies gilt auch für den empfohlenen Aufbau in **Bild 6**, bei dem nur Spannungsfühler

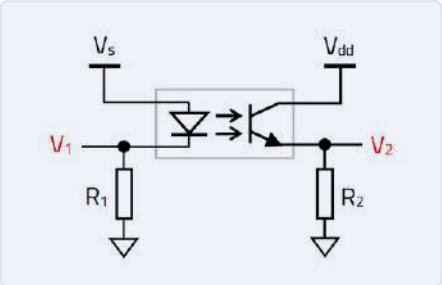


Bild 6. Empfohlener Aufbau für die CTR-Messung.

verwendet werden. Hier wird eine typische Kollektorkonfiguration verwendet. Sowohl der Ausgangswiderstand R_2 als auch die Vorspannung V_{dd} werden wie in der Endanwendungsschaltung festgelegt, in der der Optokoppler eingesetzt wird, und für den LED-Widerstand R_1 wird derselbe Wert wie für R_2 gewählt. Anschließend findet eine Erhöhung der Eingangsgleichspannung (V_s) statt, bis die Kollektor-Emitter-Spannung (V_{CE}) den Zielwert erreicht. Das CTR bei dieser Gleichstrom-Vorspannungsbedingung ergibt sich nach **Gleichung 4**:

$$CTR = \frac{V_2}{V_1}$$

Weitere Parameter im Detail

Die Application Note ANO007 [2] bietet noch deutlich weiterführende Informationen zu Optokopplern, die hier den Rahmen sprengen würden. Konkret gibt es dort:

- Ein Beispiel zur Schätzung des CTR-Bereichs sowie Wechselstrom-/Kleinsignal-CTR
- Betrachtung von Frequenzgang und Bandbreite mit Messwerten
- Schaltzeiten und Schaltzeitschwankungen
- Optokoppler-Gleichstromvorspannung
- SPICE-Modellierung

230546-02



Über den Autor

Eleazar Falco hat Elektrotechnik an der Universität Elche in Spanien studiert. Von 2014 bis 2017 arbeitete er im Vereinigten Königreich in der Elektronik-Hardware-Entwicklung von verschiedenen Haushaltsgeräten, mit Schwerpunkt auf Offline-Stromversorgung und Motorsteuerung. Seit 2018 ist Falco Applikationsingenieur für Leistungselektronik bei Würth Elektronik in Deutschland, wo er sich auf Schaltnetzteile spezialisiert.

WEBLINKS

[1] Optokoppler Phototransistor WL-OCPT von Würth Elektronik: http://tinyurl.com/mvfevy24
[2] Falco, Eleazar: Grundlagen zu Phototransistor-Optokopplern. Application Note ANO007 von Würth Elektronik: http://www.we-online.de/ANO007
[3] WL OCPT 817: http://tinyurl.com/y9crwd9a

Die komplexe Lösung oder die Lösung von Anybus?

Embedded Industrial Ethernet als Kurzstrecke statt als Marathon

Ein Beitrag von HMS Networks

Industrielle Netzwerke nehmen eine zunehmend wichtigere Rolle in der Steuerung von Maschinen, Fabriken und Lagern ein. Was einst mit dem einfachen Management von Ferneingaben und -ausgaben begann, hat sich zu weitgehend skalierbaren Netzwerken entwickelt, die selbst die komplexeste Steuerung gesamter Fabriken mit tausenden von Knoten ermöglichen. Die meisten Knoten sind oftmals vorgefertigte Produkte wie Antriebe, I/O-Stationen oder Sensoren. Doch was ist, wenn Sie ein industrielles Netzwerk mit einem neuen von Ihnen entwickelten Gerät verbinden möchten?

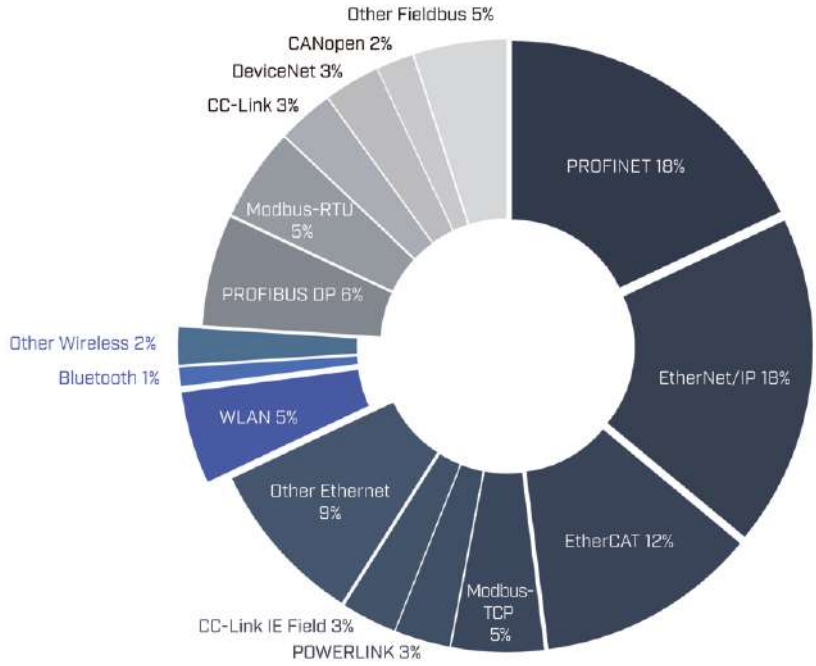


Bild 1. Die 2023 von HMS Networks durchgeführte Studie ergab ein Gesamtwachstum der installierten Knoten von 7 %.

Industrielle Netzwerke

Es ist wichtig, zu verstehen, dass der Begriff „industrielle Netzwerke" eine große Vielfalt industrieller Protokolle umfasst (**Bild 1**). Hierzu zählen Feldbusse wie Profibus, Modbus RTU oder CANopen, die hauptsächlich in Umgebungen mit großen Entfernungen eingesetzt werden. Dies könnten beispielsweise große Brennstofftanks sein, wo Sensoren und andere Knoten in Abständen von mehreren hundert Metern zueinander installiert sein können.

Andere Netzwerke sind Ethernet-basiert, wie etwa Profinet, EtherNet/IP oder EtherCAT. Sie bieten eine hohe Qualität und möglicherweise sogar Echtzeit-Eigenschaften, bei denen Genauigkeit eine wesentliche Rolle spielt. Die schnellsten Protokolle können Zykluszeiten von 50 µs bei einer Abweichung von < 1 µs erreichen. Dies ermöglicht eine sehr genaue Synchronisierung von Maschinen. Zusätzlich zu den Echtzeit-Aspekten werden in der Industrie zunehmend Cloud-Verbindungen genutzt. Auch hierfür stehen verschiedene Protokolle zur Verfügung. Derzeit verwenden etwa 25 % des Markts Feldbusse und weitere 70 % Ethernet-Varianten. Die verbleibenden 5 % nutzen Wireless-Technologien.

Die Wahl der zu verwendenden Protokolle ist jedoch nicht völlig freigestellt. Sie sind oftmals mit einem bestimmten SPS-Hersteller verbunden und können aus diesem Grund einen eigenen typischen Marktanteil haben. Daher sind in Europa Protokolle wie Profibus,

Profinet oder EtherCAT sehr beliebt, während in Nordamerika EtherNet/IP am häufigsten verwendet wird.

Stellen Sie sich vor, Sie haben einen Barcode-Scanner entwickelt, der in Logistik-Anwendungen eingesetzt werden soll. Die Systemintegratoren, die den Scanner in ihren Systemen nutzen werden, bestimmen – oftmals auch in Absprache mit dem Endkunden – das zu verwendende Netzwerk. Die Wahl des Protokolls wird letztendlich vom Kunden abhängen, und Sie haben keine Kontrolle darüber, wo dieser seinen Standort hat oder welche SPS er möglicherweise verwendet. Aus diesem Grund muss Ihr Scanner in der Lage sein, mehrere Protokolle zu unterstützen.

Entwicklung von Schnittstellen für industrielle Netzwerke

Welche Aspekte umfasst die Entwicklung eines Produkts, das mehrere industrielle Netzwerkschnittstellen beinhaltet? Offensichtlich werden verschiedene Hard- und Softwareprodukte benötigt. Alle Feldbusse verwenden unterschiedliche Anschlüsse. CAN-Bus hat seinen eigenen physischen Treiber (ISO 11898), Profibus (DP) verwendet RS485 und so weiter, und selbst zwischen den Ethernet-Varianten bestehen Unterschiede. Die meisten liefern 100 Mbit/s, aber sobald Sie über RJ45 und PHY hinaus gehen, bemerken Sie Unterschiede. Manche können MACs verwenden, die anders konzipiert wurden sowie Puffer, manchmal Echtzeituhren (IEEE 1588) oder ihren eigenen Ethernet-Controller (EtherCAT). CC-Link IE ist eine oftmals in Japan verwendete Gigabit-Verbindung. Darüber hinaus nutzen einige Industrien anstatt der traditionellen Kupferkabel auch Lichtwellenleiter.

Die Software ist sogar noch komplexer. Für jedes Protokoll sind Highspeed-Datenstrom-Prozessoren und Stacks am Markt verfügbar. Diese sind jedoch nicht einfach nur Bibliotheken, die Sie mit Ihrer eingebetteten Software verknüpfen können. Sie erfordern tiefgehende Kenntnisse eines bestimmten Protokolls und dessen Implementierung. Darüber hinaus ist jeder Stack mit einem separaten Treiber ausgestattet, der an die Ziel-Hardware angepasst werden muss. Stacks stammen oftmals von verschiedenen Lieferanten mit jeweils einer eigenen API, sodass die Anwendungssoftware an jedes verwendete Protokoll angepasst werden muss. Alle implementierten Protokolle müssen zertifiziert sein, damit sie alle technischen Netzwerkanforderungen erfüllen. Und da natürlich Protokolle fortlaufend weiterentwickelt werden, sind regelmäßige Updates erforderlich.

Wie bereits erwähnt, findet die Verarbeitung von Protokollen auf drei Schichten (Layern) statt: der Hardware-Schicht (mit dem MAC), der Highspeed-Datenstromverarbeitung und dem Stack, der das Protokoll verarbeitet. Diese sind oftmals separate Elemente der Gestaltung, wie etwa ein ASIC für die erste Schicht und die verschiedenen Softwareebenen im Mikrocontroller für die anderen beiden Schichten. Es ist wenig überraschend, dass diese Zusammenarbeit nicht immer reibungslos funktioniert. Die Entwicklung einer Schnittstelle für mehrere Netzwerke ist daher eine ebenso komplexe wie zeitaufwändige Aufgabe, die Monate in Anspruch nehmen kann.

Geht es nicht einfacher?

Das unter dem Markennamen Anybus des schwedischen Unternehmens HMS Networks arbeitende Team entwickelt seit 1995 komplexe Netzwerkschnittstellen, die alle Kommunikationsaufgaben übernehmen. Das Anybus CompactCom 40 ist die vierte Generation einer fortlaufenden Weiterentwicklung, um die neuesten und schnellsten Netzwerke wie etwa die aufstrebenden Gigabit-Netze oder TSN-Protokolle unterstützen zu können. Anybus CompactCom ist eine eingebettete Kommunikationsschnittstelle, die alle Schichten – Hardware, Datenverarbeitung und Stack(s) – in ihrem NP40-Chip kombiniert, wobei die ersten beiden Teile in einen FPGA integriert sind und der Stack auf dem eingebauten Mikrocontroller läuft. Beide sind für die Kommunikation optimiert. Diese Kommunikationsschnittstelle arbeitet für alle Protokolle mit ein und derselben API, was einzigartig ist. Anybus CompactCom bietet den Vorteil, dass es die Informationen verarbeitet, anstatt sie nur weiterzugeben. Zusätzlich zu den weithin bekannten lokalen und globalen Varianten wird eine neue Art von Variable geschaffen: die ***Netzwerkvariable.*** Diese wird in dem CompactCom-Modul gespeichert und dient als Mechanismus, durch den Daten mit Ihrer Anwendung ausgetauscht werden. Wenn Sie ein CompactCom-Modul durch eine Version für ein anderes Protokoll ersetzen, werden weiterhin die gleichen Variablen geteilt und für Ihre Anwendung ändert sich daher nichts. Mit nur einer einzigen Entwicklung erhalten Sie Zugang zu allen bekannten Feldbus- und Ethernet-Protokollen.

Das Anybus CompactCom ist in verschiedenen Formfaktoren erhältlich. Ein Modul (Anybus M40) kann ganz einfach durch Einschieben in einen Steckplatz oder auf einer Platine installiert werden (**Bild 2**). Das Modul hat einen entsprechenden Netzwerkstecker, wie etwa RJ45 für Ethernet-Varianten und SUB-D9 für Profibus. Dies bietet



Bild 2. Links: Vollwertiges Kommunikationsmodul M40. Rechts: Teil-integriertes Brick B40. Die kompakte Lösung, wenn Größe und Flexibilität der Anschlüsse entscheidende Faktoren sind.

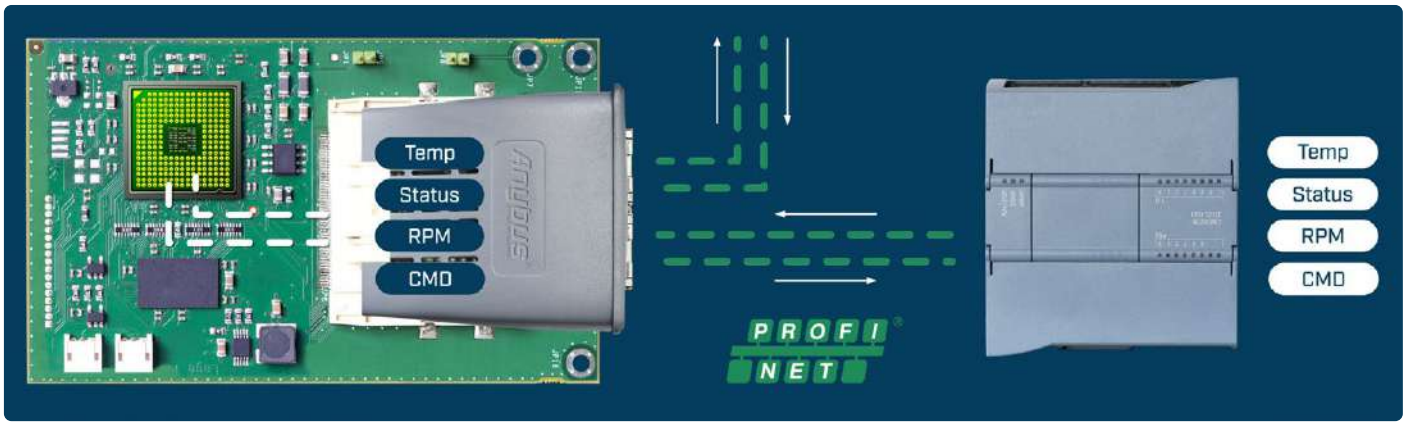


Bild 3. Anybus CompactCom tauscht Informationen mit der SPS und anderen Knoten aus.

den Vorteil, dass das Modul auch zu einem späteren Zeitpunkt – möglicherweise durch den Endnutzer zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme – installiert werden kann.

Darüber hinaus steht das B40 Brick (eine teil-integrierte Kommunikationsschnittstelle) zur Verfügung, das mittels zweier Stiftleisten auf einer Leiterplatte aufgesetzt werden kann. Im Gegensatz zum M40-Modul ist das B40 nicht mit einem Netzwerkstecker ausgestattet, sodass Sie als Anwender Ihre bevorzugten Anschlüsse verwenden können. Beide Versionen verwenden denselben NP40-Chip und sind technisch identisch.

Das CompactCom kann über parallelen (8/16 Bit) oder SPI-Datenaustausch mit dem Mikrocontroller in Ihrer Anwendung integriert werden. Zusätzlich ist ein mit einem I/O des Mikrocontrollers verbundenes einfaches Zurücksetzen erforderlich. Eine kleine, in der Programmiersprache C geschriebene Softwareschnittstelle ist für die Integration ohne Aufpreis erhältlich.

Eine kürzere Implementierungszeit bietet viele Vorteile

Diese einbaufertige Komplettlösung von HMS Networks verkürzt den Zeitaufwand der Implementierung erheblich. Sobald die Hardware bereit ist, ist die Software innerhalb von zwei bis drei Tagen betriebsbereit und die ersten Informationen werden mit der SPS oder dem Master ausgetauscht.

Das Anybus CompactCom ist vorzertifiziert und funktioniert garantiert entsprechend dem Protokollstandard (**Bild 3**). Die Vorzertifizierung von CompactCom beschleunigt den gesamten Zertifizierungsprozess Ihres Geräts, weil die Tests oftmals in kürzerer Zeit durchgeführt werden können.

Einfach dank seiner vielen Funktionen

Das Anybus CompactCom bietet zahlreiche Extras. Alle Ethernet-Varianten sind mit einem Web-Server ausgestattet, der die Verbindung mit der finalen Anwendung über einen Standardbrowser ermöglicht. Darüber hinaus verfügt es über eine komplette Dateistruktur, die über FTP zugänglich ist und beispielsweise genutzt werden kann, um die Host-Firmware herunterzuladen. Darüber hinaus unterstützt es E-Mail-Clients, WebSockets et cetera.

Für weitere Informationen zur Anybus-CompactCom-Lösung besuchen Sie [1].

230603-02

WEBLINK

[1] Anybus von HMS Networks: https://anybus.com

YOUR KEY TO
CELLULAR
TECHNOLOGY



WÜRTH
ELEKTRONIK
MORE THAN
YOU EXPECT

WE are here for you!
Nehmen Sie teil an unseren kostenlosen Webinaren: **www.we-online.com/webinars**

Adrastea-I ist ein Cellular-Modul mit hoher Leistung, extrem niedrigem Stromverbrauch, Multi-Band LTE-M und NB-IoT-Modul.

Trotz seiner kompakten Größe verfügt das Modul über integriertes GNSS, integrierten ARM Cortex M4 und 1 MB Flash-Speicher für die Entwicklung von Benutzeranwendungen. Das Modul basiert auf dem leistungsstarken Sony Altair ALT1250 Chipsatz. Das von Deutsche Telekom zertifizierte Adrastea-I-Modul ermöglicht eine schnelle Integration in Endprodukte ohne zusätzliche branchenspezifische Zertifizierung (GCF oder Betreiberzulassung, sofern eine Deutsche Telekom IoT-Konnektivität (SIM-Karte) verwendet wird. Für alle anderen Betreiber bietet das Modul bereits die branchenspezifische Zertifizierung (GCF) an.

www.we-online.com/gocellular

- Kompakte Größe
- Sicherheit und Verschlüsselung
- Lange Reichweite/weltweite Abdeckung
- Multiband Unterstützung



Ihre essentielle DFM-Checkliste

Wie Sie mit dem Entwurf für die Fertigung beginnen

Von Mark Patrick (Mouser Electronics)

Der Wettlauf um die Markteinführung neuer Elektronikprodukte ist unaufhaltsam. Design- und Entwicklungsteams müssen sich in einer schnelllebigen Umgebung zurechtfinden, in der Designprototypen innerhalb von Wochen erstellt werden müssen. Das rasante Entwicklungstempo vom Entwurf bis zum fertigen Produkt kann jedoch dazu führen, dass Probleme und Herausforderungen erst sehr spät im Produktionsplanungsprozess entdeckt werden. Dadurch gerät der Zeitplan für die Produkteinführung ins Stocken, denn diese technischen Designprobleme müssen zuerst gelöst werden.

Fast jedes Elektronikdesign ist heutzutage mit mehreren Einschränkungen konfrontiert. Die häufigsten betreffen den Funktionsumfang des Produkts, den verfügbaren Platz und das Profil der Stromaufnahme.

Und die Umsetzung eines fertigen Designs in die Produktion bringt zusätzliche Herausforderungen für das Beschaffungsteam mit sich, zum Beispiel:

- Verfügbarkeit von Bauelementen und Vorlaufzeit
- Risiko von Produktfälschungen
- Veralterung und andere Fragen des Lebenszyklus

Design- und Beschaffungsteams stehen gemeinsam vor zahlreichen Herausforderungen, aber durch die Einführung eines DFM-Ansatzes (Design-for-Manufacturing) können mögliche Probleme bereits vor Beginn der Produktion erkannt werden. Anhand einer DFM-Checkliste können Hersteller Produktionsprobleme beheben und den gesamten Design-, Lieferketten- und Produktionsprozess optimieren.

Probleme erkennen

Für das Designteam kann der Beginn einer neuen Entwicklung sehr spannend sein. Ausgangspunkt ist häufig eine Marketing-Spezifikation, in der die Merkmale, Funktionen und Fähigkeiten eines neuen Produkts auf der Grundlage der Markterwartungen definiert werden. Sie bildet den Ausgangspunkt für die Entwickler, die ein erstes Designkonzept ausarbeiten und eine Vielzahl weiterer Designfragen ermitteln. In der Regel bestimmen die funktionalen Anforderungen die Zusammensetzung der Entwicklungsteams, also beispielsweise die Teams für Mechanik, Hardware, Software und in zunehmendem Maße auch die Nutzererfahrung. Jede Abteilung des Teams prüft die Spezifikation und weist auf mögliche Probleme oder den Bedarf an weiteren Informationen hin.

Viele dieser Teilaspekte können sich auf mehr als eine technische Funktion auswirken oder mögliche Beschränkungen des Designs aufzeigen. Das Mechanik-Team kann beispielsweise folgende Fragen aufwerfen:

- Wird das Produkt am Handgelenk des Benutzers getragen und welche maximale Größe ist für verschiedene Benutzer optimal?
- Ist für die Outdoor-Nutzung ein Spritzwasserschutz erforderlich?

Das Hardware-Team könnte folgende Fragen stellen:

- Welche Lebensdauer soll die Batterie haben?
- Welcher Display-Typ passt zu den Anforderungen der Spezifikation? Soll das Display auch bei hellem Tageslicht ablesbar sein? Soll eine Touch-Bedienung möglich sein?
- Welche maximalen Abmessungen stehen für die Leiterplatte zur Verfügung? Der zur Verfügung stehende Platz muss wie bei einem dynamischen Puzzle optimal genutzt werden, denn es müssen Leiterplatte, Display und Batterie untergebracht werden!

Die Entwicklung eines neuen Designs ist ein komplexes Puzzle, bei dem es auf ein Höchstmaß an Kooperation und Kommunikation zwischen der Lieferkette, der Produktion, dem Marketing und der Entwicklung ankommt. Die Komponenten- oder Konstruktionsentschei-

dungen des Mechanik-Teams können sich auf andere Unternehmensbereiche auswirken, nicht nur auf die Kollegen aus der Entwicklungsabteilung. Wenn beispielsweise ein Display auf eine bestimmte Weise montiert wird, kann dies für den Benutzer unangenehm sein und zu Problemen bei der Empfindlichkeit des Touchscreens führen.

Erstellung Ihrer DFM-Strategie

Ihre Design-for-Manufacture (DFM)-Strategie sollte einen klaren Rahmen vorgeben, der alle Designentscheidungen und deren mögliche Auswirkungen auf folgende Bereiche berücksichtigt:

- Beschaffung von Bauelementen
- Materialhandhabung
- Materialkosten
- Produktionsprozesse
- Endmontage
- Qualitätssicherung und Prüfung
- Unterstützung während des gesamten Lebenszyklus

Ein DFM-Prozess hat stets zum Ziel, die Produktentwicklung und -produktion zu optimieren, die Kosten zu senken und eine reibungslose Markteinführung zu gewährleisten. Eine erfolgreiche DFM-Strategie sollte ein einziger, ganzheitlicher Prozess sein, der die Kommunikation und Zusammenarbeit mit allen relevanten Funktionsgruppen umfasst. Auf diese Weise können Entwicklungs-, Beschaffungs- und Produktionsprobleme gemeinsam gelöst werden, bevor es zu größeren Verzögerungen kommt. Dabei ist eindeutige, ständige und rechtzeitige Kommunikation von entscheidender Bedeutung.

Zentrale Aspekte der DFM-Checkliste

Ihre DFM-Checkliste sollte viele potenzielle Aspekte enthalten. Im Folgenden finden Sie einige der gängigsten gemeinsamen Punkte für Hersteller elektronischer Produkte, gruppiert nach Geschäftsfunktionen.

Konstruktionstechnische Überlegungen

Entscheidung für diskretes oder modulares Design

Dies ist eine häufige Herausforderung für viele Entwicklungsteams. Viele gängige Schaltungsfunktionen sind heute in handelsübliche ICs integriert. Beispielsweise können drahtlose Transceiver von spezialisierten HF-Ingenieuren von Grund auf neu entwickelt oder als einzelnes, kompaktes und behördlich zugelassenes Modul erworben werden. Drahtlose Transceiver sind auch als integrierte Mikrocontroller in Form eines drahtlosen System-on-Chip (SoC) erhältlich. Ein weiteres häufiges Beispiel sind DC/DC-Wandler. Grundsätzlich sollten folgende Überlegungen berücksichtigt werden:

- Ein Modul hat den Vorteil, dass es auf der Stückliste (Bill of Materials, BOM) nur eine einzige Position darstellt und somit eine Vielzahl nicht umlagefähiger Entwicklungskosten einsparen kann. Aber wird es auch die genauen Parameter liefern, die für die Applikation erforderlich sind?
- Ein diskreter Ansatz kann die exakten Designkriterien erfüllen, allerdings auf Kosten der Entwicklungszeit und der Verlängerung der Stückliste. Rechtfertigt das Design einen diskreten Ansatz?
- Wie hoch sind die Stücklistenkosten des Moduls im Vergleich zu den Kosten für eine Handvoll diskreter Bauteile?
- Bedenken Sie zudem, dass die Stücklistenkosten nicht der einzige Faktor sind. Beschaffung, Verwaltung und Lagerhaltung können teurer sein als die Bauteile selbst. Welche zusätzlichen Kosten und Nachteile würde das für Ihr Unternehmen mit sich bringen?
- Module haben häufig den Vorteil, dass sie platzsparend sind und auf der Leiterplatte nur eine minimale Montagefläche benötigen. Müssen Sie bei Ihrem Design Platz sparen?
- Wie nah sind die Leistungsparameter der diskreten Schaltung an einem geeigneten Modul? Kann das Design so angepasst werden, dass ein gängiges Modul verwendet werden kann?

Einhaltung von Sicherheits- und Typgenehmigungsvorschriften

- Welche Normen muss Ihr Design erfüllen? Häufige Beispiele hierfür sind Benutzerisolierung, Sicherheit, EMI/EMV, HF-Typenzulassung, funktionale Sicherheit.
- Wurden Zeit- und Kostenschätzungen für die Einhaltung der Normen berechnet? Handelt es sich dabei um eine spezielle Fähigkeit, für die eine externe Beratung erforderlich ist?
- Könnte ein modulares Konzept die Konformitätsprüfungen überflüssig machen und die Komplexität der Produktionstests erheblich vereinfachen und den Durchsatz verbessern?

Kriterien für die Auswahl der Bauteile

Auf den ersten Blick mag dieses Thema relativ einfach erscheinen. Es kann jedoch weitreichende Folgen für die Beschaffung von Bauelementen, die Verwaltung der Stückliste und die Suche nach Zweitlieferanten haben. Die Entwicklungsteams spezifizieren möglicherweise ein bestimmtes Bauteil auf der Grundlage der Schaltungsanforderungen, ohne Alternativen, unterschiedliche Hersteller oder Beschaffungsoptionen zu berücksichtigen.

- Passive Bauelemente werden in der Regel mit einem bestimmten Toleranzwert innerhalb eines bestimmten Bereichs spezifiziert. Sind Bauelemente mit großem Toleranzbereich notwendig? Die Bauart von Kondensatoren (Keramik, Polymer und so weiter) wirkt sich ebenfalls auf ihren Preis aus. Wenn alle Bauelemente mit der gleichen Bauart und einem niedrigeren Toleranzbereich ausgewählt werden, lassen sich die Kosten und die Komplexität der Stückliste verringern und die Lagerverwaltung vereinfachen.
- Wurde ein bestimmtes Bauelement bereits vom Beschaffungsteam eingekauft? Wie sieht es mit der Verfügbarkeit aus? Gibt es einen geeigneten zweiten Lieferanten oder wurde bei diesem bereits bestellt?
- Viele ICs sind in verschiedenen Gehäusegrößen erhältlich. Wurde das am meisten Platz sparende Bauelement ausgewählt?
- Handelt es sich bei dem IC-Gehäuse um eine Sondergröße? Würde eine gängigere (und preiswertere) Gehäusegröße die Anforderungen des Designs trotzdem erfüllen?
- Ist das Bauelement gängig und leicht erhältlich? Hat der Hersteller ein End-of-Life-Datum angegeben?

Lieferkette

Verfügbarkeit von Bauelementen

- Wurden bei der Entwicklung alternative Bauelemente berücksichtigt, mit denen die Beschaffung vereinfacht, die Stücklistenkosten reduziert und die Produktionstests erleichtert werden könnten?

- Wie viel Material wird in der Regel auf Vorrat bestellt, und was bedeutet das für die Stückzahl des Endprodukts?
- Stehen Ihre Lieferanten in regelmäßigem Kontakt mit dem Beschaffungsteam? Werden Sie über mögliche Verzögerungen, Engpässe oder Zuteilungen auf dem Laufenden gehalten?
- Wurde eine Liste mit kritischen Bauelementen erstellt, bei denen Lieferschwierigkeiten auftreten könnten? Wird diese Liste regelmäßig überprüft und kontrolliert? Werden auch die alternativen Bezugsquellen überwacht?

Weitere Beschaffungsrisiken

- Bieten Ihre Lieferanten standardmäßig die Rückverfolgbarkeit von Bauelementen an? Produktfälschungen gibt es überall in der Elektronik-Lieferkette. Daher ist eine ständige Überwachung notwendig. Sie sollten deshalb nur mit seriösen Lieferanten zusammenarbeiten und auf der Rückverfolgbarkeit bestehen.
- Überwachen Ihre Lieferanten auch umgepackte Bauelemente? Ebenso wie Produktfälschungen führen auch solche Teile zu kostspieligen Ausfallzeiten, Produktionsausfällen und Kosten für Ersatzmaterialien, wenn sie erst einmal in einem Produkt verbaut sind.
- Werden alle erhaltenen Bauelemente auf alle erforderlichen Dokumentationen und Zertifikate hin überprüft? Die Zertifizierung kann zwar kompliziert werden, ist aber für einige Produktapplikationen zwingend erforderlich.

Produktion

Warenumschlag von Bauelementen reduzieren

- Wie häufig müssen Bauelemente von Ihren Zulieferern umgeschlagen werden? Kostengünstige Teile wie passive Bauelemente benötigen wenig Platz, und der Zeit- und Arbeitsaufwand für ihren Transport von einem Ort zum anderen ist kostenintensiv. Werden diese Elemente direkt an den Produktionsstandort geliefert?
- Werden Rückverfolgbarkeits- und Konformitätstests für die Bauelemente produktionsnah durchgeführt?
- Können Ihre Lieferanten Sie bei der Reduzierung des Umschlags unterstützen? Bieten sie einen Kitting-Service an?

Montageprozess vereinfachen

- Wie viele Schritte und Prozesse umfasst die Montage des Endprodukts? Könnten sie reduziert oder einige Aufgaben zusammengefasst werden?
- Könnte die Verwendung von Modulen den Aufwand für Produktionstests oder Kontrollen verringern?
- Werden für Teilmontage-Aufgaben Sub-Unternehmer eingesetzt? Ist dies praktisch und effizient? Könnten sie mehr übernehmen oder sind sie spezialisiert?

Globale Überlegungen

Abgesehen von den Aspekten, die sich auf spezifische Geschäftsbereiche auswirken, bringt der globale Charakter der Lieferkette für Elektronikkomponenten viele weitere geopolitische, Nachhaltigkeits- und Umweltaspekte mit sich.

- Haben Sie oder Ihr Lieferant die Versorgung der Hersteller von Bauelementen mit Rohstoffen im Blick? Verwenden Ihre Bauelemente Seltene Erden oder Stoffe, deren Angebot knapp ist?
- Wie stark ist Ihre Materiallieferkette von regionalen oder nationalen Handelsstreitigkeiten oder geopolitischen Spannungen betroffen? Haben Sie die Newsfeeds aller relevanten Lieferanten abonniert?
- Wie sieht Ihre Unternehmenspolitik in den Bereichen Umwelt, Soziales und Unternehmensführung aus? Führen Sie oder eine externe Organisation Audits bei Ihren Lieferanten durch und überwachen deren nachhaltigkeitsbezogene Performance?
- Haben Sie eine Richtlinie zur sozialen Verantwortung des Unternehmens veröffentlicht? Wie ist diese mit Ihren Produktdesign- und Entwicklungsmethoden abgestimmt?
- Sind Ihre Lieferanten in Regionen ansässig, in denen es bereits zu Umweltkatastrophen gekommen ist oder die für solche Katastrophen anfällig sind? Gibt es einen Notfallplan für den Fall, dass es erneut zu einer Störung der Lieferkette kommt?

Diese DFM-Checkliste enthält nur einige der Schritte, die zur Formulierung und Umsetzung einer DFM-Strategie erforderlich sind. Durch eine regelmäßige und intensive Kommunikation mit allen internen Funktionsbereichen, Bauteillieferanten und Herstellern von Unterbaugruppen können Probleme frühzeitig erkannt werden.

Mouser unterstützt Ihre DFM-Strategie mit Online-Tools und -Services

Mouser bietet kostenlose Tools wie beispielsweise FORTE, eine Anwendung zur Stücklisten- und Bestandsverwaltung, um Sie beim Einkauf von Bauelementen zu unterstützen. Dieses Tool kann die Grundlage für das Management Ihres Produkts während seines gesamten Lebenszyklus bilden. FORTE bietet unter anderen folgende zeitsparende Funktionen:

- Ein Indikator für den Bauelementeabgleich, der dafür sorgt, dass der richtige Artikel aus der Stückliste ausgewählt wurde
- Preisunterschiede bei unterschiedlichen Stückzahlen werden bei sich ändernden Stücklistenmengen markiert
- Stücklistenimport mit jeder gängigen Tabellenkalkulationsdatei oder natives Erstellen in FORTE
- Benachrichtigung über potenzielle Bestands- und Veralterungswarnungen
- Funktion zum Exportieren von Stücklisten

Eine vollständige Liste der wesentlichen Funktionen von FORTE sowie eine Kurzanleitung finden Sie hier [1].
Für die Entwicklungsphasen von Hardware und Mechanik stehen umfassende Produktinformationen wie Datenblätter, 3D-CAD-Modelle und Leiterplatten-Footprints zum kostenlosen Download zur Verfügung [2].
Eine Reihe hilfreicher Tools, wie beispielsweise Umrechnungstools, Projektmanager, APIs, Auftragsautomatisierung, Services und viele andere finden Sie unter [3]. Schauen Sie sich um und entdecken Sie hilfreiche Tools.

230576-02

WEBLINKS

[1] Liste der wesentlichen Funktionen von FORTE : https://eu.mouser.com/bomtool
[2] Datenblätter, 3D-CAD-Modelle und Leiterplatten-Footprints: https://eu.mouser.com/electronic-cad-symbols-models
[3] Mouser Online-Tools und -Services: https://eu.mouser.com/servicesandtools

almit
Technology for the future

FREI

von Halogen, Graping und lunkerbezogenen Problemen



NH-GE

Die Lötpaste, die befreit.

Almit GmbH Unterer Hammer 3 **DE 64720 Michelstadt** **almit.de** info@almit.de



Filamente für den 3D-Druck

Arten, Eigenschaften und Verwendung im Prototyping

Ein Beitrag von Transfer Multisort Elektronik Sp. z.o.o.

Der 3D-Druck ist eine auf dem Markt ziemlich etablierte Lösung, obwohl er in der Wahrnehmung vieler Menschen noch recht frisch und innovativ ist. Die Möglichkeit, ganze Objekte von Grund auf neu zu drucken, hat nicht nur unsere Denkweise über das Prototyping verändert, sondern auch den Prozess der Umsetzung solcher Projekte. So wie ein herkömmlicher Drucker nicht ohne Kartusche oder Toner auskommt, kann ein 3D-Drucker ohne Filament nichts auskommen, und dieses kann verschiedene Eigenschaften haben, auf die es sich lohnt, bei der Materialwahl zu achten.

Quelle: © mari1408/Adobe Stock

Was sind 3D-Druckfilamente?

3D-Druckfilamente [1] sind thermoplastische Materialien, die zum Drucken von 3D-Objekten verwendet werden, indem geschmolzenes Material von einem 3D-Drucker aufgetragen wird. Sie sind in verschiedenen Typen und Farben erhältlich und bestehen aus Materialien wie ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol), PLA (Polylactid), PET (Polyetheretherphthalat), Nylon und vielen anderen. Sie werden in Form von auf Rollen gewickelten Coils geliefert, die dann in den 3D-Drucker eingelegt werden. Das abgerollte thermoplastische Material wird durch eine Düse gedrückt, die auf eine Temperatur erhitzt wird, die es zum Schmelzen bringt. Die Düse, die den Materialfluss steuert, bewegt sich räumlich gemäß den Anweisungen der Software (beispielsweise CAM). Dies ist vergleichbar mit der Stereolithographie (SLA), bei der die Herstellung ebenfalls durch das Aufbringen aufeinanderfolgender lasergehärteter Schichten erfolgt. Der 3D-Druck wird in immer mehr Bereichen eingesetzt, was auch zu einer Erweiterung der Liste der auf dem Markt verfügbaren Filamente führt. Einige basieren auf natürlichen Rohstoffen, während andere vollständig aus künstlichen Materialien synthetisiert werden. All diese Typen haben jedoch eines gemeinsam: Sie sind dünne und lange Fasern, mehrere Dutzend oder sogar mehrere hundert Meter lang, die auf Spulen in verschiedenen Größenstandards gewickelt sind. Diese Spulen lassen sich bequem am Drucker montieren und demontieren; seitliche Abdeckungen verhindern, dass die Fasern von der Spule rutschen.

Filamente von anerkannten Lieferanten sind in zwei grundlegenden Faserdurchmessern erhältlich: 1,75 mm und 2,85 mm. In der Regel werden sie sorgfältig und ohne versehentliche Verdickungen oder Unregelmäßigkeiten hergestellt. Dies ist sehr wichtig für die Qualität des Druckvorgangs, denn jede Aufdickung ist eine Materialzugabe in der Düse und ein etwas anderes Verhalten des Materials, wenn es auf die bestehende Schicht aufgetragen wird. Dabei sollte man bedenken, dass die Dicke einer typischen Einzelschicht etwa 80 % des Düsendurchmessers beträgt, der normalerweise etwas weniger als einen halben Millimeter beträgt (bei einer Düse mit einem Durchmesser von 0,4 mm beträgt die resultierende Schicht beispielsweise 0,32 mm).

Eigenschaften der wichtigsten Arten von Filamenten

Es gibt viele Arten von Filamenten und damit auch von Materialien, aus denen sie hergestellt werden. Es gibt jedoch eine Gruppe, die man sicherlich als die beliebtesten Materialien bezeichnen kann und die man bei der Arbeit mit 3D-Druckern kennen sollte:

ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol)

Dies ist eine der beliebtesten Arten von 3D-Druckfilamenten. ABS ist langlebig, druck- und abriebfest und kommt auch mit hohen Temperaturen gut zurecht. Es ist daher ein ideales Material zum Drucken von Elementen, die einer langfristigen Arbeit unter anspruchsvollen Bedingungen ausgesetzt sind. Es kann jedoch schwierig zu verarbeiten sein und beim Drucken gefährliche und unangenehme Gerüche abgeben, und ohne ein Heizbett und Bettkleber neigt es zum Verziehen. Die Drucktemperatur reicht von 210...250 °C. ABS-Filamente [2] entstehen durch den thermoplastischen Syntheseprozess. Dieses Verfahren besteht darin, die drei Komponenten Acrylnitril, Butadien und Styrol in einem spezi-

ellen Gerät zu mischen, das als Kontinuierlicher Mischer bezeichnet wird, um eine homogene Masse zu erhalten. Diese Masse wird auf eine hohe Temperatur erhitzt, um sie zu schmelzen, dann wird sie durch eine Düse geleitet, die sie zu feinen Fasern formt. Im nächsten Schritt werden diese Fasern gekühlt und auf Rollen gewickelt. Das richtige Mischen der Zutaten und das richtige Verschmelzen und Formen der Filamente ist entscheidend, um qualitativ hochwertige Filamente zu erhalten, die in 3D-Druckern gut funktionieren. Typische Anwendungen von ABS sind Haushaltsgeräte, Fahrradhelme und Bausteine für Kinder. Alle Arten von Gehäusen, Abdeckungen, Griffen, Hebeln oder kleinen Abschlusselementen werden ebenfalls aus ABS gefertigt. Wichtig ist, dass dieses Material nicht mit Lebensmitteln in Berührung kommt.

PLA (Polylactid)

Es ist eine ungiftige und biologisch abbaubare Art von Filament, einfach zu verarbeiten und sicher für die Umwelt, was es heute zur beliebtesten Art von Filamenten für den 3D-Druck macht. PLA ist flexibler und weniger widerstandsfähig gegen hohe Temperaturen als ABS. Gleichzeitig ist es einfacher zu drucken, da es sich nicht verzieht und kein Heizbett benötigt, es gibt sich mit niedrigeren Drucktemperaturen (180…230 °C) zufrieden und es sondert keine unangenehmen Gerüche ab. Der Anwendungsbereich von PLA ist sehr breit und umfasst beispielsweise Ausstellungsprodukte (Figuren) oder verschiedene Konstruktionselemente, wodurch viele Farbversionen verfügbar sind. PLA-Filamente werden [3] als Ergebnis des thermoplastischen Syntheseverfahrens hergestellt. Bei diesem Verfahren werden natürliche Rohstoffe (zum Beispiel Maisstärke) mit chemischen Zusatzstoffen wie Milchsäure (Polymilchsäure) und Polyethylenglykol vermischt. Diese Masse wird, wie praktisch alle Filamente, auf eine hohe Temperatur erhitzt und dann durch eine geeignete Düse geleitet, wodurch sie zu dünnen Fasern geformt wird. Im nächsten Schritt werden diese Fasern natürlich gekühlt und dann auf Rollen gewickelt.
Ein wichtiger Punkt ist die geringe Beständigkeit von PLA gegenüber höheren Temperaturen, weshalb daraus gedruckte Elemente nicht bei Temperaturen über 55…60 °C verwendet werden sollten. Große Vorteile sind die Eignung, Elemente aus diesem Rohstoff als Basis zu verwenden, wenn mit Filamenten mit speziellen Eigenschaften (etwa die Leitfähigkeit) gearbeitet wird, sowie die biologische Abbaubarkeit des Filaments.

PETG (Polyethylenterephtalat-Glycol)

Dies ist ein haltbarer und flexibler Filamenttyp mit vollständiger Beständigkeit gegen Wasser und Chemikalien, weshalb es regelmäßig zum Drucken von Gegenständen wie Flaschen und anderen Verpackungen verwendet wird. PETG-Filamente [4] werden als Ergebnis der thermoplastischen Synthese von Rohstoffen wie Terephthalsäure und Glycerin und mehreren zusätzlichen chemischen Verbindungen hergestellt, darunter Antioxidantien und Stabilisatoren. Die Beständigkeit dieses Filaments gegenüber Chemikalien (Öle, Fette oder Benzin) ist seine wichtigste Eigenschaft, so dass es sehr häufig verwendet wird. Es zeichnet sich zudem durch geringe Opazität (Durchsichtigkeit) aus, was in vielen Anwendungen wichtig ist.

PA (Polyamid, Nylon)

Es ist eine haltbare und flexible Art von Filament, unlöslich und widerstandsfähig gegen Abrieb und mechanische Beschädigungen. Nylon wird häufig zum Drucken von Teilen verwendet, die hohen Belastungen standhalten müssen, wie Zahnräder und Zugfedern. Gleichzeitig sollte man seine hygroskopischen Eigenschaften berücksichtigen und sich während des Druckens vor schädlichen Dämpfen schützen, die es ausstößt. Nylonfilamente [5] werden während eines thermoplastischen Syntheseverfahrens hergestellt, an dem Rohstoffe wie Azealsäure und Glycerin teilhaben, denen auch Antioxidantien und Stabilisatoren zugesetzt werden.

PC (Polycarbonat, Polyacrylnitril)

Dies ist eine Art Filament, das gegen hohe Temperaturen beständig ist und ein hohes Maß an Haltbarkeit aufweist. PC, auch Polycarbonat genannt, wird häufig zum Drucken von Teilen verwendet, die hohen Temperaturen und Belastungen standhalten müssen. PC-Filamente werden in einem thermoplastischen Syntheseprozess hergestellt, bei dem Rohstoffe wie Bisphenol A und Carbonsäure zusammen mit chemischen Zusatzstoffen in der Form von Antioxidantien und Stabilisatoren gemischt werden.

TPE (thermoplastische Elastomere) und Varianten

Dieses Material ist ein Kunststoff mit gummiähnlichen Eigenschaften, was es extrem flexibel und langlebig macht. Dabei ist jedoch zu beachten, dass es sich im Grunde nicht um eine Materialart handelt, sondern um eine ganze Klasse von Copolymeren und Polymermischungen, deren weiche und dehnbare Fasern Belastungen standhalten, denen weder ABS noch PLA gewachsen ist. TPE-Filamente [6] werden häufig bei der Herstellung von Autoteilen, Haushaltsgeräten und medizinischem Zubehör verwendet, aber sie sind nicht einfach zu handhaben - TPE ist oft schwer zu pressen.
Eine besondere Art von TPE ist thermoplastisches Polyurethan (TPU) [7], dessen Filamente sehr beliebt sind. Im Vergleich zu normalem TPE ist dieses Material etwas steifer, wodurch es einfacher zu drucken ist. Es ist auch etwas haltbarer und behält seine Flexibilität bei niedrigen Temperaturen besser. Genau wie TPE ist es jedoch auch ein anspruchsvolles Druckfilament – es erfordert einen schmalen Filamentweg und eine langsame Druckgeschwindigkeit bei Temperaturen zwischen 210 °C und 230 °C.
Eine andere Art von TPE ist thermoplastisches Copolyester (TPC). Es ist nicht so weit verbreitet, aber in einigen Anwendungen kommt seine höhere Beständigkeit gegen Chemikalien und UV-Strahlen sowie gegen Temperaturen bis zu 150 °C zum Tragen, ohne das Material zu stark zu beschädigen.

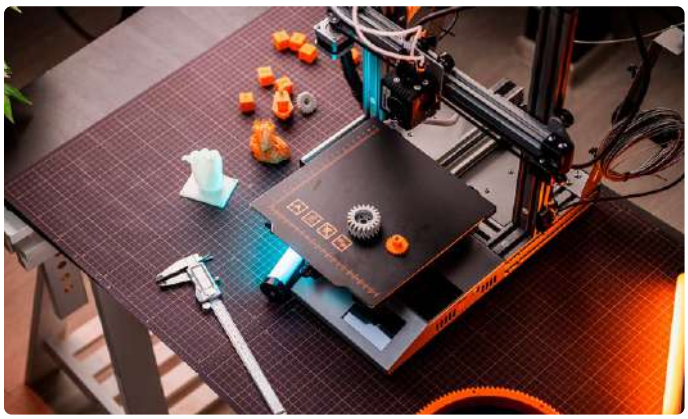
3D-Druck im Prototypenbau

Die Bedeutung des 3D-Drucks für das Prototyping kann heute gar nicht hoch genug eingeschätzt werden. Diese Technologie ermöglicht die schnelle und kostengünstige Erstellung physischer Modelle, was die Design- und Testphase verkürzt und eine viel schnellere Implementierung des Produkts in seiner endgültigen Form ermöglicht. Basierend auf dem 3D-Druck können Designer und Ingenieure viele physische Varianten eines bestimmten Produkts erstellen, um Form, Größe und Funktionalität zu

testen und die beste Option auszuwählen. Dies ist beispielsweise für die Automobilindustrie ideal, wo der 3D-Druck häufig bei der Konstruktion und Erstellung von Prototypen von Karosserieelementen oder Teilen verwendet wird, die später im Fahrzeuginnenraum montiert werden.
Ein weiteres Beispiel für den Einsatz des 3D-Drucks im Prototyping ist die Erstellung von medizinischen Modellen wie Prothesen, Endoprothesen oder chirurgische Instrumente. Auch hier ist es enorm wichtig, die endgültige Form des Modells schnell zu finden, weshalb die Popularität von 3D-Druckern in der Medizinbranche sehr schnell wächst. Erwähnenswert ist schließlich das Prototyping der eigentlichen Formen für die Spritzgussfertigung – auch hier ermöglicht der Einsatz des 3D-Drucks letztlich die schnelle und einfache Herstellung neuer Kunststoffprodukte.
Der Einsatz von 3D-Druck in Prototyping-Prozessen hat noch eine weitere , finanzielle Dimension. Prototypen selbst herzustellen, anstatt sie an externe Subunternehmer zu vergeben, ist viel kostengünstiger und schützt nebenbei auch besser das geistige Eigentum eines bestimmten Herstellers.

3D-Druck in der Elektronik

Es liegt auf der Hand, dass der 3D-Druck auch beim Designen von elektronischen Schaltungen und Geräten seine Anwendung gefunden hat. Bei der CAD/CAM-Konstruktion entwerfen spezielle Programme Leiterplatten, die Elektronik und die Gehäuse. Mit der Möglichkeit des sofortigen Druckens können diese Gehäuse schnell und effizient entworfen und modelliert werden, bis das Optimum erreicht ist.
Die neuesten Lösungen ermöglichen jedoch noch etwas mehr: das Drucken von Gehäusen [8] zusammen mit der darin eingebetteten Elektronik. Dies ist das Ergebnis der Kombination zweier bisher recht unabhängiger Prozesse – des 3D-Drucks und der automatischen Anordnung und Bestückung von Bauteilen auf der Platine [9] – mit einer sehr interessanten Lösung, nämlich dem leitfähigen



Quelle: © ProstoSvet / Adobe Stock

Filament. Das Ergebnis ist also eine Maschine, die voll funktionsfähige elektronische Geräte herstellt. Zunächst muss das gesamte Layout in der entsprechenden Entwicklungsumgebung entworfen und dann an die Software gesendet werden, die das Ganze zu einer Datei zusammenfügt, aus der der Drucker Informationen zum Drucken des Gehäuses, zum Herstellen leitfähiger Verbindungen und zum Anordnen der Bauteilen ausliest.
Der 3D-Druck ermöglicht auch die Kleinserienfertigung, die Produktion für Einzelaufträge oder die Fertigung von Elementen für Beta-Tests. Darüber hinaus kann man damit auch Ersatzteile für nicht standardmäßige Geräte erstellen, die normalerweise sehr teuer sind.

Filamente im Angebot von TME

TME bietet Filamente an, die von vielen renommierten Lieferanten hergestellt werden und ein breites Spektrum an Materialien auf Basis synthetischer und natürlicher Inhaltsstoffe präsentieren. Es handelt sich also um Kunststoffe wie ABS in verschiedenen Varianten, ASA (Acrylnitril-Styrol-Acrylat) [10], HIPS (hochschlagfestes Polystyrol) [11], PA (Nylon oder Polyamid), PCABS (Mischung von Polycarbonat und ABS) [12], PET (Polyethylenterephthalat), PLA (Polylactid), PMMA (Polymethylmethacrylat) [13], PVA (Polyvinylalkohol) [14], SILK (eine Variante von glänzendem PLA) [15] und thermoplastische Elastomere TPE und TPU. Ergänzt wird das Angebot durch für spezielle Industrieanwendungen angepasste Filamente aus der die Serie *iglidur*® [16] auf Basis von Hochleistungsbasispolymeren mit einer Beimischung verschiedener Faserarten und Festschmierstoffen. Die letzteren Komponenten verleihen den Materialien die bevorzugten Eigenschaften, die in bestimmten engen Anwendungen erforderlich sind, beispielsweise die notwendige Haltbarkeit, Festigkeit oder begrenzte Reibung und Verschleiß von gedruckten Elementen. Dadurch eignen sie sich perfekt für bei der Produktion von Lagern.

230577-02

WEBLINKS

[1] 3D-Druckfilamente: https://tinyurl.com/tmefilamentDE
[2] ABS-Filamente: https://tinyurl.com/tmeabsfilamentDE
[3] PLA-Filamente: https://tinyurl.com/tmeplafilamentDE
[4] PETG-Filamente: https://tinyurl.com/tmepetgfilamentDE
[5] Nylonfilamente: https://tinyurl.com/tmenylonfilamentDE
[6] TPE-Filamente: https://tinyurl.com/tmetpefilamentDE
[7] TPU-Filamente: https://tinyurl.com/tmetpufilamentDE
[8] Elektronikgehäusen: https://tinyurl.com/tmegehause
[9] Universalleiterplatten: https://tinyurl.com/tmeunipcbDE
[10] ASA-Filamente: https://tinyurl.com/tmeasafilamentDE
[11] HIPS-Filamente: https://tinyurl.com/tmehipsfilamentDE
[12] PCABS-Filamente: https://tinyurl.com/tmepcabsfilamentDE
[13] PMMA-Filamente: https://tinyurl.com/tmepmmafilamentDE
[14] PVA-Filamente: https://tinyurl.com/tmepvafilamentDE
[15] SILK-Filamente: https://tinyurl.com/tmasilkfilamentDE
[16] Filamente aus der die Serie iglidur: https://tinyurl.com/tmeiglidurfilamentDE

TME Germany GmbH
Dohnanyistraße 28-30
04103 Leipzig
tme@tme-germany.de
www.tme.eu/


MACH, WAS WIRKLICH ZÄHLT.
LAND
FOLGE DEINER BERUFUNG.
Werde Elektroniker/in (m/w/d)
für gepanzerte Fahrzeuge!
bundeswehrkarriere.de
BUNDESWEHR

Spezialisten für eine effektive Signalauswertung von ELF bis EHF-Band

Aaronias neueste Echtzeit-Spektrumanalyzer der SPECTRAN® V6-Serie

Ein Beitrag von Aaronia AG

Das Millimeterwellen- oder extrem hochfrequente (EHF) Band bietet aufgrund seiner hohen Frequenzen und der damit verbundenen geringen Wellenlängen eine enorme Bandbreite und eine hohe Auflösung. Allerdings stellt die hohe Frequenz auch eine große Herausforderung für die Signalauswertung dar, da die Ausbreitungseigenschaften von EHF-Signalen anfällig für Absorption und Streuung sind. Mit den USB-Echtzeit-Spektrumanalyzern der SPECTRAN® V6-Serie stellt die Aaronia AG die passenden Werkzeuge für alle benötigten Analysen zur Verfügung. Die Echtzeit-Spektrumanalysatoren der SPECTRAN® V6 X USB-Reihe sind speziell für Nah- und Fernfeld-Messungen, zum Messen und Lokalisieren von Störstrahlungsquellen oder zur Überwachung von EMV-Problemen konzipiert. Die Echtzeitbandbreite von bis zu 450 MHz sowie die Sweep-Geschwindigkeit von >3.000 GHz/s beschleunigen alle erforderlichen Messungen enorm und sparen somit Zeit und Geld.

Innerhalb des Frequenzbereichs von 9 kHz bis 55 GHz können mit den neuen SPECTRAN® V6 X- Geräten der PLUS-Serie selbst extrem kurzzeitige Störsignale erfasst, lokalisiert und deren Ursache ermittelt beziehungsweise beseitigt werden. Die Sweep-Geschwindigkeit der ECO-, 5G- und XPLORER-Serien beträgt bis zu 3 THz/s. Sie ermöglicht eine schnellere Aktualisierung des Spektrums und die Erfassung von transienten Signalen, was insbesondere bei der Analyse von Frequenzhopping-Signalen oder bei der Suche nach intermittierenden Störungen wichtig ist.



Bild 1. SPECTRAN® V6 ECO 150XA-6 mit einem Eingang (Rx) mit 44 MHz RTBW und einem zusätzlichen 44 MHz Tx-Ausgang.

Werden beispielsweise SPECTRAN® V6 Analysatoren mit zwei Eingängen genutzt, lässt sich mithilfe der beiden Eingänge gleichzeitig vor und hinter einer Abschirmung messen. Beide Resultate können dann in Echtzeit miteinander verglichen werden, ohne dass sich der Messaufbau verändert oder etwa Kabel umgesteckt werden müssten. Dies erleichtert Mess-Aufgaben und reduziert den Aufwand erheblich.

Durch die Kombination mehrerer SPECTRAN® V6 kann die Echtzeitbandbreite beliebig erhöht werden. So erlaubt die Kaskadierung von nur vier V6 die lückenlose Echtzeitmessung zum Beispiel von 20 MHz – 1 GHz, was einen unschlagbaren Zeitvorteil bei einer Vielzahl von Messungen bedeutet. „Die Messtechnik sowie die an sie gestellten Anforderungen ändern sich rasend schnell", so Thorsten Chmielus, Geschäftsführer der Aaronia AG. „Mit unseren USB-Echtzeit-Spektrumanalyzern sind wir in der Lage, schnell auf neue Gegebenheiten zu reagieren. Mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung der SPECTRAN®-Serien setzen wir immer wieder neue Benchmarks und richten unsere Produkte zukunftssicher aus."

Leistungsstark für schmale Budgets - SPECTRAN® V6 ECO

Mit dem SPECTRAN® V6 ECO (**Bild 1**) öffnet Aaronia ein neues Marktsegment in der Echtzeit-Spektrumanalyse. Das USB-Ge-



Bild 2. SPECTRAN® V6 5G-500XA-50 mit Rx „low frequency" und Rx „high frequency".



Bild 3. RTSA-Suite PRO zeichnet die gesamte IQ-Bandbreite auf.

rät bietet in der Basisversion eine Echtzeitbandbreite (RTBW) von 44 MHz und einen erweiterten Frequenzbereich von 9 kHz bis 6 GHz. Der SPECTRAN® V6 ECO inklusive RTSA-Suite PRO kostet in der Basisversion weniger als 1.500,- Euro, eine Revolution im Markt der Echtzeit-Spektrumanalyzer. Alternativ kann das Gerät mit integriertem Signalgenerator oder als Dual-RX-Variante bestellt werden. Letztere schließt die Lücke zwischen bezahlbaren aber leistungsschwachen SDRs und teuren sowie schnellen High-End-Analysatoren. Durch die beiden unabhängigen Eingänge bietet der SPECTRAN® V6 ECO einerseits 2 × 44 MHz RTBW. Andererseits erreicht er mit der einzigartigen, patentierten High-speed-Tictoc-LO-Funktion bis zu 3 THz/s Sweepgeschwindigkeit.

Die Geräte sind im nächsten Jahr auch als 18-GHz-Version für unter 10.000,- Euro inklusive Signalgenerator erhältlich. Darüber hinaus werden fast alle Modelle mit einem optionalen PowerMeter-Eingang erweiterbar sein, welcher verlässlich Signalspitzen bis 70 GHz detektieren kann.
Für Messungen im Mobilfunk-Umfeld überzeugen die Geräte der SPECTRAN® V6 5G-Serie (**Bild 2**). Sie unterstützen neben dem bisherigen FR1-Band auch die neuen 5G-Bänder zwischen 24 GHz und 53 GHz (FR2) sowie WiGig 45 GHz (802.11aj). Die zugehörigen Frequenzprofile sind ab sofort in der neuesten Version der RTSA Suite PRO enthalten.

Schlüsselfaktor Software

Ausschlaggebend sind aber nicht nur die Echtzeitbandbreite sowie POI und Sweep-Geschwindigkeit der Hardware. Vielmehr spielt die eingesetzte Software eine entscheidende Rolle. Mit der modularen Echtzeit-Spektrumüberwachungssoftware RTSA-Suite PRO liefert Aaronia ein mächtiges Softwarepaket zur Signalaufzeichnung und Datenanalyse. So erlaubt die Record & Replay Funktion des SPECTRAN® V6 in Verbindung mit der RTSA-Suite PRO die Aufzeichnung und Wiedergabe der vollen IQ-Bandbreite (**Bild 3**). Auf diese Weise lassen sich alle Informationen auf dem lokal angeschlossenen Computer speichern, die zur Wiederherstellung eines Signals notwendig sind, um es detailliert zu untersuchen. Ein weiterer unschätzbarer Vorteil ist die grundsätzlich unbegrenzte Aufzeichnungsdauer, die nur von der Kapazität der verwendeten Speichermedien abhängt.
Bedienungskomfort steht bei Aaronia an vorderster Stelle. Mithilfe des modularen Baukastensystems lassen sich selbst komplexe Messaufgaben innerhalb kürzester Zeit per Drag & Drop konfigurieren. Durch Zusammenstellen verschiedener Blöcke entsteht ein visuelles Abbild des Messaufbaus. Häufig benötigte sogenannte Missions können als fertige Projekte gespeichert und bei Bedarf abgerufen werden. Zahlreiche vordefinierte Konfigurationen stehen auf der Aaronia-Webseite zum Herunterladen zur Verfügung [1]. Diese lassen sich in die RTSA-Suite PRO einlesen, wodurch sofort mit den Messungen gestartet werden kann. Handelt es sich um kostenpflichtige Zusatzfunktionen, so bietet Aaronia allen Bestandskunden die Option, die betreffende Funktion 30 Tage lang kostenfrei zu testen.
Eine Vielzahl von Blöcken im Gesamtwert von 7.782,00 Euro sind bereits kostenlos in der Basisversion enthalten. Hierzu gehören unter anderem diverse 2D- und 3D- Ansichten, IQ-Verarbeitung, Trigger, AM/FM-Dekoder, Filereader und Filewriter, Remote HTTP oder Scripts.

Nicht nur für den SPECTRAN® V6

Die RTSA-Suite PRO lässt sich nicht nur mit Aaronia-Messgeräten verwenden, sondern ist kompatibel zu anderen Markengeräten und erweitert deren Einsatzspektrum. Wer beispielsweise per Softwarelizenz für rund 2.500 Euro seinen Tektronix-Spektrumanalyzer um die RTSA-Suite PRO erweitert, bekommt den Filewriter/Reader zum Speichern und Abspielen von Daten im Wert von 4.550,- Euro kostenlos mitgeliefert.

Upgrade-Service

Aaronia bietet einen exklusiven Trade in-Service für seine Produkte. Soll ein altes Gerät oder die Vorgänger-Version eines Produktes gegen einen Nachfolger ausgetauscht werden, werden bis zu 50 Prozent des Ursprungspreises auf das neue Gerät angerechnet. Dazu ist lediglich das entsprechende Alt-Gerät inklusive der Original-Rechnung einzusenden. Dieses Angebot bezieht sich auf alle aktiven Komponenten wie Messgeräte oder Verstärker.

Und die Zukunft?

Aaronia arbeitet bereits an den nächsten SPECTRAN®-Generationen. Mit einem Frequenzbereich bis 110 GHz (modellabhängig) ist der SPECTRAN® V6 XPLORER der neue Player im Hochfrequenzbereich. Als kostengünstige Entwicklungsplattform erschließt er aufgrund seiner Leistungsfähigkeit vollkommen neue Anwendungsgebiete.

230580-02

WEBLINK

[1] Aaronia-Webseite: https://aaronia.com

Herausforderungen der DFM-Analyse für Flex- und Rigid-Flex-Design

Ein Beitrag von DownStream Technologies

Flexible und starr-flexible Leiterplatten unterscheiden sich von starren Leiterplatten in Bezug auf Materialien, Konstruktion und Designanforderungen. Sie werden in speziellen Anwendungen wie medizinischen Geräten eingesetzt. Die Analysewerkzeuge werden weiterentwickelt, um ihren besonderen Anforderungen gerecht zu werden.

Die Flex- und Rigid-Flex-Leiterplattenkonstruktion ist kein neues Konzept. Es ist alltäglich geworden, da Ingenieure nach alternativen Schaltungsgehäusen für immer kleiner werdende elektronische Produkte suchen. Ein flacher Ein-Blatt-Schaltplan für ein gerades Flachbandkabel ist analog zu seinem physischen flachen Substrat. Ein flacher, mehrseitiger Schaltplan, der die Schaltkreise für ein Starrflex-Design detailliert beschreibt, hat optisch wenig Ähnlichkeit mit seiner dreidimensionalen Starrflex-Baugruppe aus variablem Material. In beiden Schaltplanbeispielen werden jedoch schemabasierte Analysewerkzeuge gleichermaßen angewendet. Dieselbe Wahrheit gilt auch für gängige FR4-basierte zweischichtige oder mehrschichtige Leiterplatten. Die heutigen PCB-Analysetools sind auf alle Kombinationen von starren Leiterplatten anwendbar, unabhängig von der Anzahl oder Größe der Schichten. Aufgrund der einzigartigen Eigenschaften flexibler Substrate und kombinierter flexibler und starrer Substrate erfordern flexible Designs jedoch eine spezifische Sammlung von Analysen, sowohl funktional als auch fertigungsorientiert. Integritätsanalysen wie Impedanz, Kopplung, Übersprechen und Rauschen werden durch variable Stapel in flexiblen Designs erschwert. Eine einzelne Übertragungsleitung kann eine Streifenleitung in einem starren Flexbereich und ein Mikrostreifen in einem flexiblen Bereich sein. Materialtypen und Dielektrizitätskonstanten oberhalb oder unterhalb einer Leiterbahn, die eine Konstruktion durchläuft, variieren ebenfalls. Während die Herausforderungen bei der Signalintegritätsanalyse für flexible Designs diskussionswürdig sind, konzentriert sich dieser Artikel auf die aktuellen Herausforderungen bei der *Design for Manufacturing*-Analyse von Flex- und Starrflex-Designs.

Starre Leiterplatten vs. Flex und Rigid-Flex

Einige Designer entwerfen flexible Leiterplatten als einfache biegbare Leiterplatten, aber es gibt große Unterschiede zwischen starr und flexibel. Beide Technologien erzeugen eine elektrische Verbindungsfunktion, werden jedoch mit unterschiedlichen Materialien und Verfahren hergestellt. Sie haben auch unterschiedliche Anwendungen. Es ist nicht erforderlich, eine starr-flexible Leiterplatte für das Motherboard eines Desktop-PCs zu entwerfen, aber für die meisten medizinisch implantierten Geräte ist ein starrer Flex erforderlich.

Eine typische starre Leiterplatte besteht aus galvanisch getrennten, kupferkaschierten Glasfasersubstraten, die miteinander verbunden sind. Während es Unterschiede bei den Materialien gibt, die zum Verkleben von Substraten verwendet werden, handelt es sich in der Regel um Stoffbahnen, die mit nicht ausgehärtetem Epoxidharz vorimprägniert sind. Diese Zusammensetzung des Bindungsmaterials ist nicht flexibel konstruiert. Das Kupfer wird chemisch geätzt, um ein Schaltungsmuster zu erzeugen. Die Härte der geklebten Substrate erfordert ein mechanisches Fräsen, um die Rohleiterplatten zu trimmen. Alle Schich-

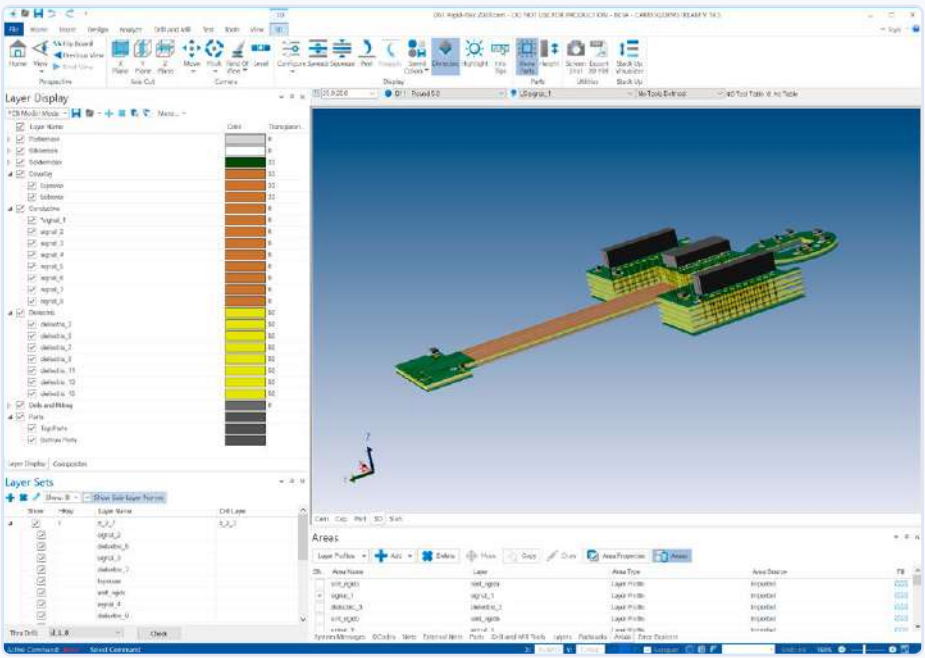


Bild 1. Ein Rigid-Flex-Entwurf in 3D mit separierten Schichten zur besseren Visualisierung.

ten der Leiterplatte sind in der Regel in Größe und Form identisch, es sei denn, es sind Hohlräume, eingebettete Komponenten oder andere exotische Konstruktionen vorhanden. Der starre Lagenaufbau der Leiterplatten ist über die gesamte Leiterplattenfläche identisch. Lötstopplack und Siebdruck werden fast immer aufgetragen.

Flexible Leiterplatten bestehen aus gewalztem, geglühtem Kupfer über flexiblen Polyimid-Substraten. Flexible Schichten oder Kerne werden mit oder ohne Klebstoffe hergestellt. Klebstofffloser Flex ist in Anwendungen weit verbreitet, die eine höhere Leistung erfordern, während solche mit Klebstoffen häufig in Anwendungen mit geringer Schichtzahl zu finden sind. Die häufigste Verwendung ist Kupferfolie, die mit Epoxid- oder Acrylkleber auf ein Substrat laminiert wird. Sowohl das Substratmaterial als auch der Klebstoff sind für das Biegen ausgelegt, um Leiterbahnbrüche zu minimieren. Wie bei starren Leiterplatten wird ein chemisches Ätzverfahren verwendet, um ein Schaltungsmuster zu erstellen. Die Flexibilität der Materialien erfordert eher das Schneiden von Matrizen oder „Stanzen" als das mechanische Fräsen. Jede Schicht eines flexiblen doppelseitigen Kerns hat eine identische Form. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass der Flex mehrerer Schichten für jede Schicht oder jeden Kern unterschiedliche Formen aufweist. Flexible Leiterplatten erfordern einen Dünnschichtisolator über den Leitern, der als Coverlay bezeichnet wird. Im Gegensatz zu starren PCB-Lötstopplacken werden Coverlays ähnlich wie die flexiblen Schichten, die sie isolieren, gestanzt. Der Aufbau einer mehrschichtigen flexiblen Leiterplatte kann über die Leiterplattenfläche variieren. Dies gilt insbesondere für Multi-Layer-Flex, bei dem die Schichtform je nach Ansammlung von Schichten oder Kernen variiert. Ein flexibler Masse- oder Leistungsebenenbereich ist bei starren Leiterplatten in der Regel schraffiert und nicht fest. Diese Kreuzschraffur verringert die Bruchgefahr von Leitern. Alternativ können flexible Schichten mit einer Schicht aus Kupfer- oder Silberfolie abgeschirmt werden. Das Maskieren und Abschirmen über flexible Schichten ist nicht selten, aber ungewöhnlich. Starr-flexible Leiterplatten sind offensichtlich eine Kombination aus starren und flexiblen Materialien. Rigid-Flex ist im Wesentlichen eine hybride Leiterplattenkombination aus Materialien und Prozessen aus starren und flexiblen Leiterplatten. Die beiden Materialarten werden in der Regel getrennt voneinander verarbeitet und später im Herstellungsprozess miteinander verbunden. Der Lagenaufbau variiert in der Regel stark über die gesamte Leiterplatte (**Bild 1**). Es kann Bereiche mit starrem Flex, nur Flex, verschiedene Kombinationen von starren und flexiblen Schichten und so weiter geben. Es gibt auch starren Flex, bei dem blankes FR4 oder andere starre Materialien selektiv mit flexiblen Substraten verbunden werden, um Steifigkeit zu gewährleisten. Das starre Versteifungsmaterial weist selten Leiter auf.

Anwendung von Rigid vs. Flex und Rigid-Flex

Starre Leiterplatten sind eine grundlegende Technologie in den heutigen elektronischen Produkten. Starre Leiterplatten bieten mechanische Integrität, elektrische Leitfähigkeit und Zuverlässigkeit, sind jedoch durch ihr zweidimensionales Profil begrenzt. Ihre Ebenheit schränkt Designer auf zwei Dimensionen ein, was die Designflexibilität stark einschränkt, insbesondere wenn elektronische Geräte immer kleiner werden. Flexible Leiterplatten werden gebogen, um einen dreidimensionalen Raum zu nutzen und gleichzeitig Komponenten aufzunehmen. Flexible Leiterplatten ermöglichen eine maximale Raumausnutzung für das Gehäuse von Elektronik, jedoch zu einem hohen Preis im Vergleich zu herkömmlichen Leiterplatten.

Starre und flexible Leiterplatten sind in vielen elektronischen Produkten vorhanden. Einige Anwendungen profitieren jedoch mehr von einem Leiterplattentyp. Starre Leiterplatten sind sinnvoll für Produkte wie Fernseher, Desktop-PCs, Blu-ray-Player und andere größere elektronische Produkte. Flexible Leiterplatten sind in Smartphones, Smartwatches, Tablets, Kameras, Druckern und Laptops vorhanden. Sie sind eine Grundvoraussetzung für implantierte Miniatur-Medizinprodukte wie Herzschrittmacher, Cochlea-Implantate und implantierte Defibrillatoren. Komplexe Multi-PCB-Baugruppen, die mit Drähten oder Kabeln verbunden sind, werden häufig mit Starrflex-Leiterplatten neu gestaltet, um die Zuverlässigkeit und das Gewicht zu verbessern und den Platzbedarf zu reduzieren. Dies ist der Katalysator für viele Produkte aus dem Militär und der Luft- und Raumfahrt, die mit Rigid-Flex entwickelt werden. Ein Beispiel ist ein Einweg-Smart-Geschoss, das seine Flugbahn ändern kann, wenn sich das beabsichtigte Ziel bewegt.

Die Einführung von Halbleitern mit kleinem Umriss oder nur oberflächenmontierten Halbleitern leitete eine Revolution der Miniatur-Neuverpackung ein. Denken Sie an einen Sony Walkman im Vergleich zu einer typischen Boombox. Jahrelang wurden flexible Leiterplatten ausschließlich als Ersatz für mehradrige Kabel verwendet. Wer erinnert sich nicht an die flexiblen Flachbandkabel, die mit dem Kopf eines Nadel- oder Anschlagdruckers verbunden ist. Der Kopf hüpfte über das Papier hin und her, während sich das Kabel dynamisch bog und eine zuverlässigere Verbindung zwischen Druckerkopf und Motherboard herstellte. Die Einführung von Rigid-Flex ist aufgrund der etwas begrenzten Anwendung und des Kostenunterschieds nicht der gleiche Wendepunkt wie oberflächenmontierte Gehäuse. Wir sollten nicht erwarten, dass eine neue Sammlung von Desktop-PCs mit Starrflex-Motherboards entwickelt wird, um die Kosten zu senken. Miniaturisierte und zuverlässige Technologien wie Pillenkameras, faltbare Mobiltelefone oder implantierte medizinische Geräte würden jedoch nicht ohne Starrflex-Technologie auskommen.

Schlussfolgerung

Sowohl Designer als auch Verarbeiter sind bisher recht gut damit zurechtgekommen, dass sie nur begrenzten Zugang zu biegespezifischen DFM-Analysewerkzeugen hatten. Heute sind Flex und Rigid-Flex immer mehr zum Mainstream geworden, und die zugrunde liegende Technologie entwickelt sich ständig weiter. Wie bei allen neueren Technologien üblich, holen PCB-Design- und Analysetools auf. PCB-CAD-Tools wurden jetzt aktualisiert, um das Design für Flex und Rigid-Flex zu unterstützen, aber vielen fehlt immer noch die Unterstützung, die für die intelligente Datenübertragung an die Hersteller erforderlich ist. Ebenso waren die meisten DFM-Tools bisher nicht ausreichend, um Flex- und Rigid-Flex-Designs auf Fertigungsprobleme hin richtig zu analysieren. Bei DownStream haben wir das Glück, eine lange Liste von Anwendern zu haben, die häufig Flex-Designs verwenden und mit uns zusammengearbeitet haben, um eine flexspezifische DFM-Lösung zu entwickeln. Und wir arbeiten weiterhin mit diesen Kunden zusammen, um unsere Fähigkeiten für die Flex-DFM-Analyse zu verbessern. Zusätzlich zu der in diesem Dokument beschriebenen Unterstützung der DFM-Analyse enthalten unsere Pläne die Möglichkeit, zusätzliches Spurbruchpotenzial wie I-Träger zu analysieren, sowie eine verbesserte 3D-Visualisierung und DFM für eine Flex und Rigid-Flex im gebogenen Zustand (**Bild 2**). Dies sind nur einige Beispiele. Wie die zugrunde liegende Technologie müssen auch die PCB-Design- und Analysetools kontinuierlich weiterentwickelt werden, um den Kundenerfolg zu gewährleisten, und dies ist ein Eckpfeiler des Engagements von Downstream für unsere Branche.

230590-02



Einrichten einer SMT-Fertigungsstrecke

Ein Beitrag von Opulo

Opulo

Elektronische Schaltungen zu entwickeln und zu fertigen ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Bei sehr kleinen Stückzahlen ist der Einsatz einer Pinzette und das manuelle Einsetzen der Bauteile in eine gedruckte Schaltung ausreichend, aber ab einer Stückzahl von einigen Dutzend Leiterplatten ist dies nicht mehr praktikabel. Bei Hunderttausenden von Einheiten pro Jahr kann die Auslagerung der gesamten Montage, Programmierung und Qualitätskontrolle an eine Fabrik eine gute Lösung sein. Aber was passiert dazwischen? Bisher gab es nur zwei Möglichkeiten: ineffiziente manuelle Montage oder teures Outsourcing. Jetzt haben Sie die Möglichkeit, selbst eine SMT-Produktionsstrecke für die Herstellung von Leiterplatten aufzubauen und somit Geld für teure Lohnfertigung zu sparen. Gleichzeitig bleibt die Qualitätsicherung durch den Verbleib der Produktion in Ihrem Haus. In diesem Artikel wird gezeigt, wie Sie Ihre eigene SMT-Produktionslinie zur Herstellung Ihres Produkts einrichten und betreiben können.

Lötpaste und Schablonen

Das Auftragen von Lötpaste ist der erste Schritt bei der SMT-Bestückung. Die Paste wird mit einem Rakel über eine Edelstahlschablone auf der Leiterplatte verteilt, so dass die Paste nur dort aufgetragen wird, wo sie benötigt wird (**Bild 1**). Für einen erfolgreichen Pastendruck gibt es drei entscheidende Komponenten.

Paste

Für den Erfolg Ihrer Produktionslinie kann die Wahl der richtigen Lotpaste für Ihre Leiterplatte einen großen Unterschied ausmachen. Eine gute Paste ist leicht zu schablonieren und wird sauber aufgeschmolzen, ohne dass fehlerhafte Lotkugeln entstehen. Chipquick SMDLTLFP250T3 ist eine ausgezeichnete Paste für niedrige Temperaturen, die sehr einfach in der Verarbeitung ist. Sie eignet sich auch hervorragend für Reflowöfen, die Probleme haben, die Standard-Reflowspitzentemperatur von 250 °C zu erreichen. Loctite GC10 ist ebenfalls eine ausgezeichnete Paste, wenn Ihr Reflowofen 250 °C problemlos erreichen kann. Neben einer unglaublich langen Standzeit und einem sauberen Reflowprozess ist die Wahrscheinlichkeit von Brückenbildung oder kalten Lötstellen sehr gering.

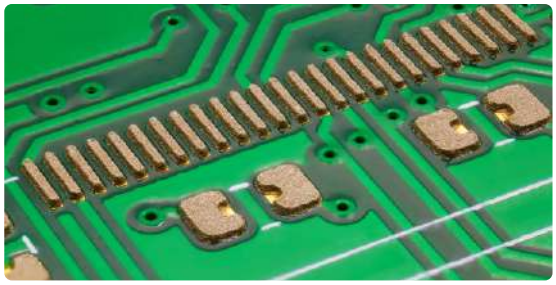


Bild 1. Platine mit mit Hilfe der Schablone aufgetragener Lötpaste.

Schablone

Zum Auftragen der Lotpaste nur an den Stellen, an denen die Bauteile auf Ihrer Leiterplatte Lotpaste benötigen, benötigen Sie auch eine Schablone. Dabei handelt es sich um dünne, mit einem Laser ausgeschnittene Bleche aus rostfreiem Stahl, die mit Aussparungen versehen sind, die mit den Pads auf Ihrer Platine übereinstimmen, so dass ein Rakel die Paste nur an der richtigen Stelle auftragen kann. Kaufen Sie diese Schablonen bei Ihrem Leiterplattenhersteller zu einem sehr günstigen Preis.
Eine gängige Option der meisten Leiterplattenhersteller ist das Elektropolieren der Schablone. Dies führt zu einer längeren Lebensdauer der Schablone und einem saubereren Pastenauftrag. Sie können Ihre Schablone auch „gerahmt“ erhalten: Das Stahlblech ist in einem Aluminiumrahmen zur Verwendung mit einer Pastenschablone fixiert.

Pastendrucker

Ein Pastendrucker ist ein Gerät, mit dem die Ausrichtung der Schablone auf der Leiterplatte perfekt und wiederholbar ist. Es ist von entscheidender Bedeutung, dass die Schablone genau auf der Leiterplatte ausgerichtet ist. Jede kleinste Abweichung kann dazu führen, dass Lotpaste neben den Pads aufgetragen wird. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit von Lötbrücken erheblich. Der Lotpastendrucker 3040 ist eine zuverlässige und kostengünstige Wahl, die auch lange nach dem Einrichten korrekt ausgerichtet bleibt.

Platzierung der Bauteile

Die präzise Platzierung der Bauteile auf der unbestückten Leiterplatte ist wahrscheinlich der schwierigste Teil der PCBA-Fertigung. Und mit dieser Schwierigkeit kommen weitere Herausforderungen. Selbst die billigsten dieser Maschinen können mehrere zehntausend Dollar kosten und benötigen eine industrielle Umgebung mit Hochdruckluft, um zu funktionieren. Im Gegensatz dazu ist der LumenPnP (**Bild 2**) [1] ein Desktop-Bestückungsautomat, mit dem Sie Ihre Leiterplatten zu einem Bruchteil der Kosten bestücken können - und das in jeder beliebigen Umgebung. Der LumenPnP ist in der Lage, Bauteile bis hinunter zu 0402 zu verarbeiten, und verfügt sogar über angetriebene Zuführungen, die für einen kontinuierlichen Strom von Bauteilen in die Maschine sorgen, so dass der Bestückungsprozess vollständig automatisiert ist. Einmal eingerichtet, brauchen Sie Ihre bestückte Leiterplatte nur noch zu einzulegen, und der Bestückungsauftrag wird ausgeführt.

Die Maschine ist in hohem Maße konfigurierbar. Sie unterstützt ein breites Spektrum von Anforderungen an Leiterplatten. Bis zu 50 angetriebene Feeder und Platz für einige Dutzend Stripfeeder sind auf der Maschine möglich. Das hat zur Folge, dass auch eine Leiterplatte mit einer Vielzahl von Bauteilen in einem Arbeitsgang bestückt werden kann. Der LumenPnP kann auch sehr große Leiterplatten bis zu 360 mm × 270 mm bestücken.

LumenPnP ist vollständig Open Source, was bedeutet, dass Sie Ihre Maschine ohne Einschränkungen verändern, verstehen und warten können. Darüber hinaus gibt es eine Community von mehreren tausend Personen, die ständig daran arbeitet, die Maschine zu aktualisieren, zu modifizieren und zu verbessern.

Reflow

Jetzt, wo Sie eine bestückte Leiterplatte haben, brauchen Sie einen Reflow-Ofen. Der Reflow-Ofen erhitzt und schmilzt die Lötpaste. Während dieses Erhitzungsprozesses sollte ein spezifisches, für den gewählten Lottyp optimales Temperaturprofil eingehalten werden.

Reflow Master Pro

Mit diesem Hardware-Modul lässt sich ein herkömmlicher Tischbackofen (!) in einen Reflow-Ofen verwandeln. Der Reflow Master Pro verfügt über eine fantastische Benutzeroberfläche und eine hervorragende Leistung. Er ist die Lösung, die Opulo für die gesamte PCBA-Produktion einsetzt. Sie müssen nur Ihren eigenen Tischbackofen aus der Küche entführen und die Installation selbst vornehmen. Aber die Ergebnisse sind die Mühe wert.

WEBLINKS

[1] LumenPnP: https://opulo.io/products/lumenpnp
[2] „Open Hardware Manufacturing Podcast“: http://shows.acast.com/ohm-podcast

Whizoo Controleo3

Für diejenigen, die einfach etwas kaufen wollen, das sofort nach dem Kauf reflowfähig ist, bietet Whizoo eine Lösung von der Stange. Es ist etwas teurer als die anderen Optionen, dafür wird der gesamte Zusammenbau für Sie erledigt. Der Controleo3 hat außerdem einen Mechanismus zum Ablassen der heißen Luft aus der Reflow-Kammer nach Abschluss des Prozesses, so dass die Abkühlphase des Temperaturprofils besser eingehalten werden kann.



Bild 2. LumenPnP 3.1 mit einer Reihe angetriebener Feeder.

Testen

Das Testen Ihrer Leiterplatte nach dem Reflow-Prozess ist wichtig. Hierfür gibt es kein Patentrezept, da dies sehr stark von Ihrem Design abhängt, aber es gibt eine Reihe von Werkzeugen, die Ihnen beim schnellen und genauen Testen Ihrer fertigen Leiterplatte behilflich sein können.

Obwohl eine Anpassung an Ihr Produkt erforderlich sein wird, ist eine Testvorrichtung von der Stange ein guter Ausgangspunkt für den Aufbau einer Testlösung. Diese Prüfvorrichtungen besitzen eine Platte, auf die der Prüfling (DUT) aufgelegt werden kann, und eine Platte, die sich nach unten bewegt, um den Prüfling in eine Reihe von Federkontaktstiften zu drücken, die die Leiterplatte berühren, um die Verbindungen zu prüfen.

Diese Stifte müssen spezielle Testpunkte auf Ihrer Leiterplatte kontaktieren. Sie müssen also bereits bei der Entwicklung Ihres Produktes diese Testvorrichtung berücksichtigen. Natürlich handelt es sich dabei nur um eine konsistente Schnittstelle zu Ihrem Produkt. Die Hard- und Software, die den Test tatsächlich durchführt, müssen Sie nach wie vor selbst entwickeln.

Schneller und einfacher als eine Pogo-Pin-Vorrichtung kann jedoch ein Funktionstest sein. Dies bedeutet, dass Sie das Produkt tatsächlich so verwenden, wie es für den Test vorgesehen ist, also beispielsweise durch Anschließen von Motoren an Ihre PCBA, so dass Sie prüfen können, ob sie sich korrekt bewegen. Welche Tests Sie durchführen, hängt vom Produkt und Umfang ab.

Fazit

Sie sind auf dem besten Weg, eine fein abgestimmte SMT-Produktionsstrecke aufzubauen, wenn Sie für alle angesprochenen Themen Lösungen gefunden haben. Die Vorteile einer In-House-Montage sind beträchtlich. Sie befreit Sie von den Zwängen, die große Unternehmen mit ihren Forderungen nach Großaufträgen zu günstigeren Preisen auferlegen.

Weitere Einblicke in die Open-Hardware-Fertigung erhalten Sie im Podcast „The Open Hardware Manufacturing“ [2], in dem wir Best Practices für Ihre Hardware-Fertigung diskutieren und Open-Hardware-Fertiger befragen, wie sie schwierige Fertigungsprobleme lösen.

230593-02

Die **richtige Kombination** für die **zuverlässige Baugruppe**

Von Paolo Corviseri, Fabian Volmer (Balver Zinn)

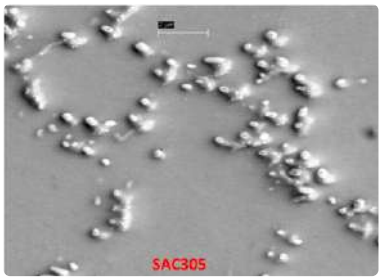


Bild 1. SAC305 nach Alterung bei 125 °C für 2520 h.

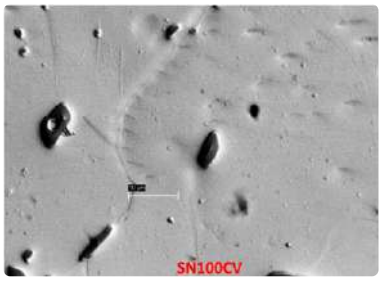


Bild 2. SN100CV® nach Alterung bei 125 °C für 4200 h.

Die fortschreitende Miniaturisierung, die steigenden Anwendungstemperaturen elektronischer Baugruppen und die Packungsdichte der Geräte stellen die Baugruppenproduzenten vor neue Herausforderungen. Die Lötmittelhersteller müssen sie mit zuverlässigen, kostengünstigeren und nachhaltigen Lösungen unterstützen. Bisherige Standards wie SAC305 oder andere Legierungen werden sukzessive hinterfragt beziehungsweise durch modernere Systeme ersetzt. Die BALVER ZINN Legierung SN100CV® ist eines dieser modernen Systeme.

Zuverlässigkeit und thermische Stabilität von bleifreien Loten

Extreme Temperaturen im Betrieb von elektronischen Baugruppen sind der technische Anwendungsbereich, der nach neuen Lösungen ruft. Eine entsprechende Lösung ist das von Nihon Superior entwickelte Lot SN100CV®. BALVER ZINN, einer der ersten Lizenznehmer für SN100CV®, bietet dieses mikrodotierte Lot mit geringen Anteilen von Bismut für hochzuverlässige Anwendungen an.

Der technische Vorteil von SN100CV® liegt im Verfestigungsmechanismus. Silberhaltige Lote, wie das SAC305, und andere Lote sind aufgrund der *Ausscheidungsverfestigung* bei thermischen Belastungen einem Phasenwachstum ausgesetzt. Dieser Effekt wird *Ostwald-Reifung* genannt und führt langfristig zur Kornvergröberung. Die Lötstelle wird spröder und degradiert. SN100CV® hingegen zeigt durch die *Substitutionskristallverfestigung* keine Phasenvergröberung (**Bild 1** und **Bild 2**).

Durch den Einbau von Atomen mit größerem Durchmesser (Bismut-Atome) ins Gefüge und damit eingehergehendes Verzerren des Gefüge-Gitters ist SN100CV® weniger anfällig für Belastungen durch hohe Temperaturen und mechanische Einwirkungen.

SN100CV® ist eine blei- und silberfreie Legierung, bei der durch Zugabe von 1,5 % Bismut die mechanischen Eigenschaften drastisch verbessert werden. Sie ist thermisch stabiler und kostengünstiger, da der Silberanteil entfällt.

Weiterhin ist die Ablegierung von Kupfer durch die Mikrodotierung mit Nickel signifikant reduziert, sodass SN100CV® optimal im Selektiv- und Wellenlöten einsetzbar ist.

Die charakteristische Veränderung der zu erwartenden Lebensdauer aufgrund der Kornvergröberung nach Thermozyklen wird im Vergleich für SAC305 und SN100CV® in **Bild 3** und **Bild 4** dargestellt.

Darüber hinaus ist SN100CV® auch als Lotpaste in Kombination mit dem Flussmittel JEAN-151 lieferbar.

Die Lotpasten-Plattform JEAN-151 greift die Eigenschaften der SN100CV®-Legierung auf und setzt sie als variantenreicher Allrounder um. Das Lotpasten-Flussmittel JEAN-151 ist sowohl für Reflow als auch für Dampfphasenlöten geeignet und als halogenidfreie ROL0-Formulierung klassifiziert (J-STD-004A). JEAN-151 ist sie mit neun verschiedenen Legierungen mit Pulver-Typ 3 bis Pulver-Typ 6 erhältlich.

Das Flussmittel JEAN-151 ist chemisch so ausbalanciert und reaktionsarm, dass BALVER ZINN sukzessive die Haltbarkeit auf nunmehr zwölf Monate Kühlschranklagerung ausgedehnt hat. Aktuelle Untersuchungen lassen darauf schließen, dass selbst bei Temperaturen <25 °C eine ähnliche Haltbarkeit zu erwarten ist.

Allen voran ist SAC305 (SnAg3,0Cu0,5) mit einem Schmelzbereich von 217...219 °C die Standardlegierung und kann in allen gängigen Prozessen eingesetzt werden (**Bild 5** bis **Bild 10**).

Die Legierungen SnIn5Ag3,5Bi0,5 und SN100CV® gelten als hochzuverlässige Legierungen und finden unter anderem Anwendung in Automotive-Bereich und der E-Mobilität.

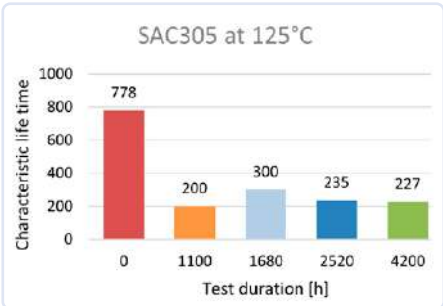


Bild 3. Lebenszyklus von SAC305 nach 4200 h.

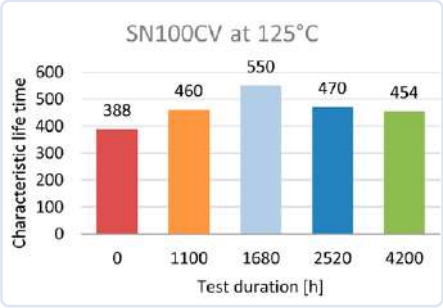


Bild 4. Lebenszyklus von SN100CV® nach 4200 h.

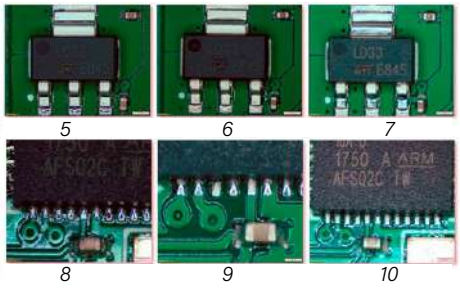


Bild 5. Reflow an Luft.
Bild 6. Reflow unter Stickstoff.
Bild 7. Dampfphasenprozess.
Bild 8. Reflow an Luft.
Bild 9. Reflow unter Stickstoff.
Bild 10. Dampfphasenprozess.

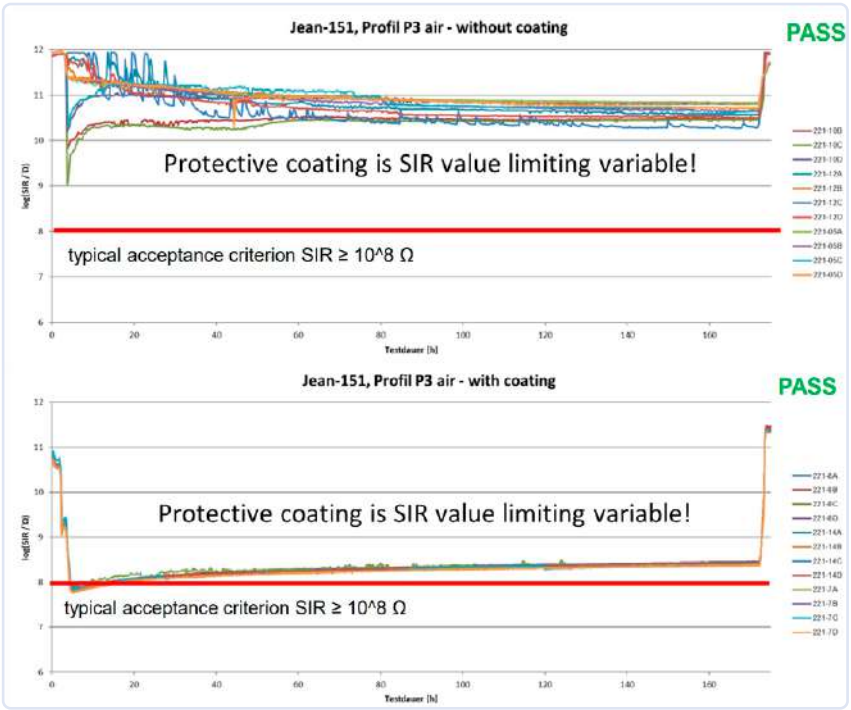


Bild 11. SIR-Tests der Lotpaste JEAN-151 SAC305 T4 mit Stickstoff sowie mit/ohne Lack der Firma Lackwerke Peters.

Um die Eigenschaften der JEAN-151 SAC305 T4 als Standardlegierungen zu verifizieren, wurde die Lotpaste bei der *Siemens CT einem statisch- dynamischen Test* inklusive SIR mit und ohne Schutzlack unterzogen. Alle getesteten Prozess- und Materialkombinationen erfüllten hierbei vollumfänglich alle Anforderungen (SIR-Isolationswiderstand ≥108 Ω), ohne Anzeichen von Korrosion, Dendriten oder Verfärbungen aufzuzeigen (**Bild 11**).

Die lackierten Kammstrukturen (Lack: *Twincure DSL 1600 E-FLZ / Fa. Lackwerke Peters*) zeigten deutlich niedrigere SIR-Werte als die unlackierten Strukturen. In der SIR-Versuchsreihe ist der Schutzlack die SIR-Werte limitierende Größe in dieser Bewertung.

Die hohe Zuverlässigkeit von SN100CV® ist selbstverständlich auch als Lotdraht SN100CV® LF2220NC verfügbar, beispielsweise ein als RELO-klassifizierter, halogenidfreier No-Clean-Lötdraht.

Aufgrund von hohen Lötspitzentemperaturen und Zuführgeschwindigkeiten neigen speziell bleifreie Lotdrähte zu Flussmittelspritzern. Bedingt durch die großen Temperaturunterschiede zwischen der Lotlegierung, dem Siedepunkt der Lösemittel und der Schmelztemperatur der Harze können sich im Inneren der Lotdrahtes hohe Temperaturen und Dampfdrücke bilden und das Flussmittel vorschädigen.

BALVER ZINN hat eine spezielle Form der Flussmittelseele entwickelt, um diesem Effekt entgegenzuwirken. Hierdurch schmilzt das Lot an einigen Stellen früher auf, es bildet sich weniger Dampfdruck und reduziert signifikant die Neigung zu Spritzern. Der optimierte Lotdraht SN100C® 2220 mit StarCore® zeigt darüber hinaus eine schnellere Benetzung, ein besseres Lötverhalten und die Flussmittelrückstände wirken erheblich klarer.

Auch das neueste niedrigaktivierte Flussmittelsystem *234E* nutzt den StarCore®-Vorteil und ist mit SIR-Werten ≥1×109 Ω geprüft (IPC-J-STD-004A). Es zeichnet sich durch deutlich klarere Rückstände, bessere Benetzung und ein gesteigertes Fließverhalten aus. Die verbesserte Benetzung garantiert eine effiziente Flussmittelverteilung. Das erhöhte Fließverhalten ermöglicht eine gleichmäßige und effektivere Verbindung. Die Benetzungseigenschaften von SN100C® StarCore®234-E, als ROLO klassifiziert, sind ähnlich oder besser als manche höher aktivierten Produkte.

Wie eingangs erwähnt, gilt die Legierung SN100CV® als hochzuverlässig und liefert beste Ergebnisse mit der optimierten REGI-Serie; allem voran das REGI-BLUE, welches als zuverlässiges und wasserbasiertes ORLO-Flussmittel zur Verfügung steht. Die Integration spezieller Komponenten hat es ermöglicht, das Korrosionsrisiko in nahezu allen Anwendungen auf ein Minimum zu reduzieren (**Bild 12**).

So erfüllt das REGI-BLUE auch im SIR-Test die Grenzkriterien RSIR = 1×108 Ω (IPC-J-STD-004A) im ungereinigten Zustand als No-Clean-Produkt. Weiterhin zeigt es keine Anzeichen von elektrochemischer Migration oder Dendriten, bei kaum sichtbaren Rückständen und exzellenten Löteigenschaften. Neben REGI-BLUE (wasserbasiert), REGI-RED (alkoholbasiert) und anderen Derivaten der REGI-Serie arbeiten wir aktuell an neuen, besseren und stärkeren Produkten.

Zusammenfassung

Nach der Erfolgsstory SN100C® geht BALVER ZINN mit der Legierung SN100CV® einmal mehr neue Wege. SN100CV® ist eine adäquate Alternative zu hochpreisigen, silberhaltigen Loten wie SAC305 und kompatibel mit allen üblichen Prozessen. SN100CV® ist sowohl als Lotpaste mit JEAN-151 als auch als Lotdraht mit beispielsweise StarCore® erhältlich und kompatibel mit der neuesten Flussmittelserie REGI. BALVER ZINN und SN100CV®, mit der richtigen Kombination zur zuverlässigen Baugruppe!

230600-02



Bild 12. Kupferkorrosionstest REGI-BLUE; Test-Coupon vor (O h) und nach dem Test (240 h).



Bild 1. Genius 2 von wheel.me.

Revolution in der Industrie

Der Aufstieg der Autonomen Mobilen Roboter (AMR)

Ein Beitrag von wheel.me

In der sich ständig weiterentwickelnden Technologielandschaft sticht eine Innovation aufgrund ihres für viele Branchen umgestaltenden Potenzials hervor - Autonome Mobile Roboter (AMR). Diese intelligenten Maschinen, die mit hoch entwickelten Sensoren, Navigationssystemen und Künstlicher Intelligenz (KI) ausgestattet sind, verändern die Art und Weise, wie wir Aufgaben und Prozesse in verschiedenen Sektoren angehen. Erkunden wir die faszinierende Welt der AMRs, ihr technologisches Umfeld und ihre praktischen Anwendungen in der Fertigung, Logistik, im Gesundheitswesen und in anderen Bereichen!



Bild 2. Automatisieren von Vorgängen mit flexiblen AMRs.

Autonome Mobile Roboter (AMR) stellen eine Bündelung von Spitzentechnologien dar, die sich dank der Zusammenarbeit wichtiger Komponenten autonom in vordefinierten Umgebungen bewegen (**Bild 1**). Sensoren, die ihre Sinnesorganen darstellen, liefern Echtzeitdaten über die Umgebung und gewährleisten die Erkennung von Hindernissen und eine sichere Navigation. Fortgeschrittene Navigationssysteme nutzen diese Sensordaten, um Karten der Umgebung zu erstellen und ständig zu aktualisieren, was eine präzise Navigation und Anpassung an dynamische Bedingungen ermöglicht. Darüber hinaus dient die Künstliche Intelligenz als kognitiver Antrieb zur Steigerung der Effizienz von AMRs, indem er es ihnen ermöglicht, aus Erfahrungen zu lernen, Routen zu optimieren und sich an ständig ändernde Umstände anzupassen. Im Wesentlichen vereinen AMRs nahtlos Sensoren, Navigationssysteme und KI, was sie zu unschätzbaren Aktivposten macht, die für ihre Autonomie und Vielseitigkeit in verschiedenen Branchen bekannt sind.

AMRs in der Fertigung

AMRs revolutionieren die Produktionsabläufe im Fertigungssektor, indem sie sich nahtlos in bestehende Prozesse integrieren. Sie können Materialien transportieren, Komponenten liefern und Aufgaben

präzise und effizient ausführen. Zu den Vorteilen gehören erhöhte Effizienz, Flexibilität und Kosteneinsparungen (**Bild 2**).

AMRs in Logistik und Lagerhaltung

Auch die Logistik- und Lagerhaltungsbranche hat AMRs schnell für sich entdeckt. In großen Lagern rationalisieren diese Roboter die Abläufe, indem sie Waren effizient bewegen, Aufträge kommissionieren und den Bestand verwalten. AMRs können mit menschlichen Mitarbeitern zusammenarbeiten, was die Produktivität steigert und das Risiko von Verletzungen am Arbeitsplatz verringert. Zu den wichtigsten Vorteilen gehören eine optimierte Auftragsabwicklung, Bestandsverwaltung und Skalierbarkeit.

AMRs im Gesundheitswesen und in der Medizin

Im Gesundheitswesen erweisen sich AMRs als unschätzbar wertvoll. Diese Roboter werden für Aufgaben wie die Auslieferung von Medikamenten, die Unterstützung der Patientenpflege und die Desinfektion von Krankenhauszimmern eingesetzt. Ihre Präzision, Zuverlässigkeit und Fähigkeit zum autonomen Betrieb machen sie zu unverzichtbaren Werkzeugen in modernen Gesundheitseinrichtungen.

Herausforderungen und künftige Trends

Auch wenn das Potenzial der AMR unbestreitbar ist, müssen für ihre breite Einführung noch einige Problemstellungen bewältigt werden. Dazu gehören die nahtlose Integration in bestehende Arbeitsabläufe, die Gewährleistung der Sicherheit und die Bewältigung hoher Einstiegskosten. Mit Blick auf die Zukunft können wir mit Fortschritten bei der künstlichen Intelligenz, einer stärkeren Vernetzung zwischen AMRs und einer breiteren Akzeptanz rechnen, wenn die Technologie ausgereift ist und die Kosten sinken.
Autonome mobile Roboter stehen an der Spitze der Automatisierung und sind im Begriff, die Industrie von Grund auf zu verändern. Von der Fertigung über das Gesundheitswesen bis hin zur Logistik - die Anpassungsfähigkeit und Effizienz machen AMRs zu unverzichtbaren Werkzeugen für moderne Unternehmen. Wheel.me [1] bietet eine bahnbrechende Lösung, indem es praktisch alles in einen AMR verwandelt (**Bild 3**) und damit die Automatisierung in allen Branchen revolutioniert. Der innovative Ansatz von wheel.me bietet eine unübertroffene Flexibilität, mit der Unternehmen vorhandene Geräte wie Wagen oder Karren in autonome Systeme verwandeln. Diese Flexibilität schont nicht nur die Investitionen, sondern erleichtert auch die Integration. Darüber hinaus demokratisiert wheel.me den Zugang zu modernster Automatisierungstechnologie und macht sie einer breiten Masse von Unternehmen zugänglich - von kleinen Betrieben bis hin zu etablierten Konzernen. Die schnelle Implementierung von AMR-Lösungen ermöglicht es Unternehmen, die Effizienz zu steigern und Kosten einzusparen, und das innerhalb von Wochen statt Monaten. Im Wesentlichen bietet die wheel.me-Technologie drei Vorteile: Anpassungsfähigkeit, Erschwinglichkeit und Agilität - und macht die Automatisierung zu einer praktikablen und transformativen Option für Branchen jeder Größe.
In dem Maße, wie sich die Technologie weiterentwickelt und die Hindernisse für die Einführung überwunden werden, können wir davon ausgehen, dass diese Roboter eine noch bedeutendere Rolle bei der Steigerung der Effizienz, der Senkung der Kosten und der Verbesserung der Sicherheit in verschiedenen Sektoren spielen werden. Das Zeitalter der AMR ist angebrochen, und es verspricht eine Zukunft, in der Automatisierung nicht nur einfach, sondern auch unglaublich leistungsfähig ist.

RG – 230606-02



Bild 3. Verwandeln Sie mit wheel.me alles in einen AMR.

WEBLINK

[1] wheel.me: https://wheel.me

Für höchste Anforderungen weiterentwickelt

R&S MXO 5 mit acht Kanälen ergänzt Oszilloskope der nächsten Generation

Ein Beitrag von Rohde & Schwarz

Mit dem brandneuen R&S MXO 5 baut Rohde & Schwarz seine Oszilloskop-Serie der nächsten Generation weiter aus. Dabei knüpft das R&S MXO 5 als erstes achtkanaliges Oszilloskop des Herstellers an das erfolgreiche R&S MXO 4 an, welches zur Markteinführung 2022 mit einer Reihe Branchenneuheiten beeindruckte. Entwicklungsingenieure können mit dem R&S MXO 5 nun noch höhere Design-Anforderungen erfüllen.



Bild 1. Das R&S MXO 5 ist das Oszilloskop der nächsten Generation, weiterentwickelt für höchste Anforderungen .



Bild 2. Ein Blick ins Innere zeigt einen speziell angepassten ASIC mit 200 Gbit/s: der MXO-EP mit hoher Signalverarbeitungsleistung.

Rohde & Schwarz präsentiert die neuen R&S MXO 5 Oszilloskope (**Bild 1**), erhältlich mit vier oder acht Kanälen. Die R&S MXO 5 Oszilloskope bauen wie schon die R&S MXO 4 Serie auf dem neuartigen MXO-EP Verarbeitungs-ASIC auf (**Bild 2**). Diese bahnbrechende von Rohde & Schwarz entwickelte Technologie ermöglicht in Verbindung mit den acht Kanälen der neuen Serie eine bisher nie dagewesene Messleistung.

Branchenneuheiten in einem Achtkanal-Oszilloskop

Das neue R&S MXO 5 Oszilloskop stellt das Signalverhalten umfassender dar als jedes andere Oszilloskop – sowohl im Zeit- als auch Frequenzbereich. Es ist das weltweit erste Achtkanal-Oszilloskop, das 4,5 Millionen Erfassungen pro Sekunde und mehr als 18 Millionen Messkurven pro Sekunde mit mehreren Kanälen erreicht, sodass Ingenieure feine Signaldetails und seltene Ereignisse mit höchster Präzision erfassen können. Dank Digitaltrigger auf allen acht Kanälen schlägt das R&S MXO 5 seine Konkurrenz auch bei der genauen Isolation kleiner Signalanomalien. Darüber hinaus ermöglicht die bahnbrechende FFT-Performance von 45.000 FFTs pro Sekunde eine ausgezeichnete Signaldarstellung im Frequenzbereich, insbesondere für Anwendungen wie EMI- und Harmonischen-Tests. Mit der höchsten Erfassungsrate der Welt erfasst das R&S MXO 5 bis zu 99 % der Echtzeit-Signalaktivität. Somit registriert es auch seltene und zufällige Ereignisse, die den meisten anderen Oszilloskopen entgehen, und beschleunigt damit die Signalanalyse erheblich. Dank dieser starken Performance können Ingenieure in unterschiedlichen Anwendungsbereichen – von Stromumwandlung bis Automotive – ihre Designs effektiver debuggen. Leistungs- und Signalintegritätsmessungen lassen sich genauso mühelos durchführen wie Logik- und Bus-Protokoll-Tests.

Philip Diegmann, Vice President des Fachgebiets Oszilloskope bei Rohde & Schwarz, erklärt: „Mit dem Start des R&S MXO 4 im Jahr 2022 haben wir die nächste Oszilloskop-Generation auf den Weg gebracht, die sich durch bisher nie dagewesene Performance und ein unschlagbares Preis-Leistungs-Verhältnis auszeichnet. Solche Errungenschaften spornen uns bei Rohde & Schwarz an, immer wieder neue Maßstäbe bei Bedienkomfort und Funktionalität zu setzen. Wir freuen uns, heute das R&S MXO 5 vorzustellen – ein weiterer Meilenstein innovativer Oszilloskop-Technik. Die neue Serie baut auf der gleichen bahnbrechenden Technologie auf und wurde von unserer Entwicklungsabteilung speziell darauf ausgerichtet, sowohl das große Ganze als auch kleinste Details eines elektrischen Signals mit beispielloser Präzision und Geschwindigkeit zu erfassen. Weiterentwickelt für höchste Anforderungen bieten die Geräte unseren Kunden bisher nie dagewesene Analyse- und Testmöglichkeiten für ihre Elektroniksysteme.“



Bild 3. Was wie ein gewöhnliches Sinussignal aussieht, kann viele weitere Frequenzanteile enthalten. Der Vier-Spektren-Ansicht hilft bei der näheren Untersuchung.

Tiefster Speicher seiner Klasse in der Standardkonfiguration

Die R&S MXO 5 Serie bietet einen Standard-Erfassungsspeicher von 500 Mpts auf allen acht Kanälen gleichzeitig – doppelt so viel wie Konkurrenzmodelle seiner Klasse. So steht reichlich Speicherplatz zur Verfügung, um große Datenmengen aufzuzeichnen. Mit optionaler Speichererweiterung lässt sich sogar eine Aufzeichnungslänge von 1 Gpts erreichen – genug auch für anspruchsvollste Anwendungen. Diese außergewöhnliche Speichertiefe der R&S MXO 5 Oszilloskope ist entscheidend bei einer Reihe von Anwendungen zur Fehlerbehebung. Längere Zeiträume lassen sich ohne Abstriche bei der Genauigkeit der Bandbreitendaten erfassen, auch bei langsamerer Zeitbasiseinstellung.

Erster digitaler Trigger für acht Kanäle

Als erstes Achtkanal-Oszilloskop mit digitaler Triggerung setzt das R&S MXO 5 einen neuen Standard in der Signalanalyse. Der digitale Trigger ist leistungsfähiger als jeder andere Oszilloskop-Trigger und verfügt über eine bemerkenswerte Empfindlichkeit von 0,0001 Div. Kleine Anomalien der Bitübertragungsschicht lassen sich auch in Anwesenheit großer Signale leicht isolieren. Währenddessen erfordern andere Geräte häufig eine Korrektur durch Signalverarbeitung, um Triggerereignisse im analogen Pfad zu synchronisieren, was zu einer langsameren und rauschanfälligeren Trigger-Performance führt. Der Digitaltrigger ergänzt die vertikale 18-bit-Architektur des R&S MXO 5 perfekt und lässt das volle Potenzial des Oszilloskops zur Geltung kommen.

Überlegene HF-Mess-Performance

Das R&S MXO 5 eignet sich hervorragend für HF-Messungen, sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich. Es ist das erste Oszilloskop überhaupt, das 45.000 FFTs pro Sekunde erreicht. Kombiniert mit der Möglichkeit, vier verschiedene zeitunabhängige Spektren gleichzeitig anzuzeigen, können Ingenieuren HF-Signale umfassender darstellen als mit jedem anderen Gerät dieser Klasse (**Bild 3**). Dabei sind diese fortgeschrittenen Funktionen Standardausstattung des R&S MXO 5.

Das Benutzererlebnis weitergedacht

Dank des riesengroßen, kapazitiven 15,6"-Full-HD-Touchscreen und der intuitiven Benutzeroberfläche, deren Bedienung sofort in Fleisch und Blut übergeht, sorgen die R&S MXO 5 Oszilloskope für ein flüssiges Benutzererlebnis und überzeugen auch visuell. Durch ihre geringe Stellfläche und die VESA-Montageschnittstelle, eine Neuheit in dieser Klasse, fügen sich die Geräte ideal in jegliche Arbeitsplätze ein (**Bild 4**). Mit dem branchenweit niedrigsten hörbaren Geräuschpegel – leiser als ein Flüstern – schafft das R&S MXO 5 eine produktive Arbeitsumgebung, in der Ingenieure ihre Aufgaben mit Präzision erledigen können.

Niedriger Einstiegspreis

Die R&S MXO 5 Oszilloskope werden sowohl als Vier- als auch als Achtkanal-Modelle mit Bandbreiten von 100 MHz, 200 MHz, 350 MHz, 500 MHz, 1 GHz und 2 GHz angeboten. Die Achtkanal-Modelle sind bereits ab 19.500 Euro erhältlich und setzen damit einen neuen Branchenstandard für den niedrigsten Einstiegspreis in dieser Geräteklasse. Benutzer mit speziellen Anforderungen können die Leistung ihres Oszilloskops mit verschiedenen Upgrade-Optionen erweitern, zum Beispiel mit der Integration von 16 digitalen Kanälen mit einer MSO-Option (Mixed-Signal Oscilloscope), einem integrierten Zweikanal-100-MHz-Arbiträrgenerator, Protokolldecodierungs- und Trigger-Optionen für Industriestandard-Busse und einem Frequenzgang-Analysator.

Die neuen R&S MXO 5 Oszilloskope [1] sind ab sofort bei Rohde & Schwarz und ausgewählten Vertriebspartnern erhältlich.

230607-01

Rohde & Schwarz zeigt das neue R&S MXO 5 Oszilloskop auf der productronica 2023 in München in Halle A1.375 vom 14. bis 17. November 2023.



Bild 4. Dank VESA-Montageschnittstelle fügen sich die R&S MXO 5 Oszilloskope ideal in verschiedenste Arbeitsplätze ein.

WEBLINKS

[1] R&S MXO 5: https://www.rohde-schwarz.com/product/MXO5

Aller Anfang...

... muss nicht schwer sein: Verstärkung von Unterschieden

Von Eric Bogers (Elektor)

Am Ende der letzten Ausgabe haben wir kurz die Konstantstromquelle beschrieben und uns gefragt, warum man eigentlich eine Schaltung braucht, die einen konstanten Strom an eine variable Last liefern kann. Dort haben wir auch diese Frage beantwortet: Ohne eine Konstantstromquelle wäre es unmöglich, einen Differenzverstärker zu bauen.

Der Differenzverstärker

Ein Differenzverstärker (der fälschlicherweise oft als Differentialverstärker bezeichnet wird) ist das Herzstück eines jeden Operationsverstärkers (Opamp). Ein Differenzverstärker hat zwei Eingänge: einen invertierenden (IN-) und einen nichtinvertierenden Eingang (IN+). Der Verstärker verstärkt die Spannungsdifferenz zwischen diesen beiden Eingängen. **Bild 1** zeigt die Schaltung eines Differenzverstärkers.

Der Spannungsteiler, bestehend aus R8 und R9, liefert eine Spannung, die etwa 2,7 V über der negativen Versorgungsspannung liegt, so dass die Spannung über R7 etwa 2 V beträgt. Der Transistor T3 arbeitet als Konstantstromquelle und liefert einen Strom von 2 mA.

Wenn die Spannungen an beiden Eingängen des Differenzverstärkers gleich sind, wird dieser Strom von 2 mA zu gleichen Teilen auf die beiden Transistoren Eingangstransistoren T1 und T2 aufgeteilt (je 1 mA). Dadurch ergibt sich über jedem der Kollektorwiderstände R1 und R2 eine Spannung von 7,5 V.

Legen wir nun eine Spannung von einigen Millivolt an den nichtinvertierenden Eingang (IN+) an, so steigt der Strom durch T1 auf beispielsweise 1,5 mA. Die Konstantstromquelle macht ihrem Namen Ehre und hält den Gesamtstrom bei 2 mA, so dass der Strom durch T2 auf 0,5 mA fallen muss. Das bedeutet, dass die Spannung über R2 auf nur 3,75 V abfällt, so dass die Ausgangsspannung des Differenzverstärkers um 3,75 V ansteigt.

Hätten wir die Spannung an den invertierenden Eingang statt an den nichtinvertierenden Eingang angelegt, wäre der Strom durch T2 gestiegen, anstatt abzufallen, und die Ausgangsspannung wäre gesunken.

Aber was passiert aber, wenn wir an *beide* Eingänge die gleiche Spannung anlegen? Die Antwort ist, dass sich die Ausgangsspannung nicht ändert, weil der gleiche Strom durch beide Transistoren fließt, wenn an beiden Eingängen die gleiche Spannung anliegt. Mit anderen Worten: Ein Differenzverstärker verstärkt die Spannungsdifferenz an den beiden Eingängen und nicht die Summe der Spannungen.

Einer der Hauptvorteile eines Differenzverstärkers ist seine hohe Temperaturstabilität, vorausgesetzt, der Temperaturanstieg in beiden Transistoren ist derselbe. Dies liegt daran, dass der Anstieg der Basis-Emitter-Spannung aufgrund der steigenden Temperatur in beiden Transistoren gleich ist, so dass sie sich gegenseitig kompensieren.

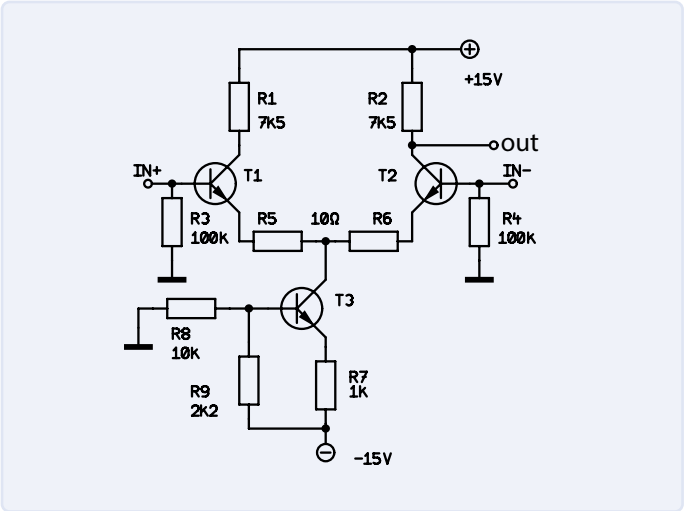


Bild 1. Der Differenzverstärker.

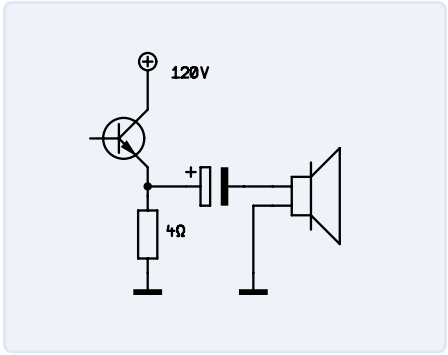


Bild 2. Eine Klasse-A-Ausgangsstufe.

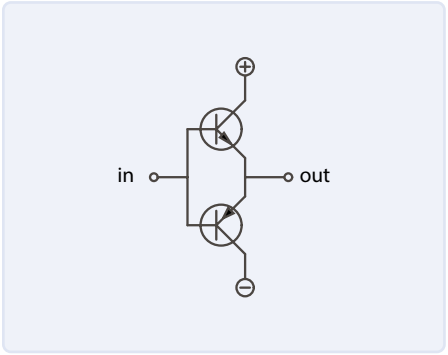


Bild 3. Eine Gegentakt-Ausgangsstufe.

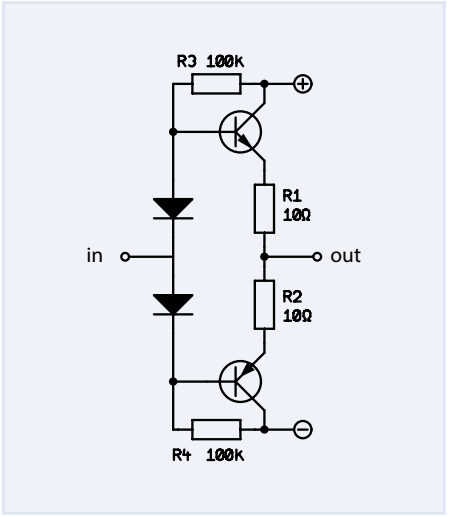


Bild 4. Der Klasse-B-Verstärker.

Der Klasse-A-Verstärker

Angenommen, Sie wollen einen Leistungsverstärker bauen, der 400 W an eine 4-Ω-Last abgeben kann. Wie Sie wahrscheinlich schon erraten haben, können Sie dafür einen Emitterfolger verwenden (siehe **Bild 2**). Ein Nachteil eines Emitterfolgers ist, dass er zwar den Ausgangskondensator aufladen kann, aber nicht in der Lage ist, den Ausgangskondensator zu entladen - was aber notwendig ist, um die negativen Halbwellen des Wechselstromsignals zu verarbeiten, was natürlich erforderlich ist. In der Praxis wird der Kondensator über den Emitterwiderstand entladen. Das bedeutet, dass sein Widerstand nicht höher sein sollte als die Ausgangsimpedanz (des Lautsprechers), die in diesem Fall ebenfalls 4 Ω beträgt. Für die Erbsenzähler unter unseren Lesern: Wir ignorieren hier völlig die Tatsache, dass ein Lautsprecher keine ohmsche Last ist, sondern ein ziemlich komplexes Gerät mit einer entsprechend komplexen Impedanz. Damit ein Lautsprecher seine Aufgabe richtig erfüllen kann, sollte der Verstärker eine möglichst niedrige Ausgangsimpedanz haben, damit die Lautsprechermembran entsprechend bedämpft wird. Das Verhältnis zwischen der Lastimpedanz und der Ausgangsimpedanz wird als Dämpfungsfaktor bezeichnet und sollte möglichst hoch sein. Es ist in der Praxis nicht möglich, mit einem 4-Ω-Emitterwiderstand einen guten Dämpfungsfaktor zu erreichen. Dafür muss der Widerstand viel kleiner sein. Aber wir brauchen hier nicht ins Detail zu gehen.
Sie können die folgende Formel zur Berechnung der Ausgangsspannung verwenden:

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{400\ \text{W} \cdot 4\ \Omega} = 40\ \text{V}$$

Dies ist der Effektivwert. Die Spitzenspannung ist um den Faktor Wurzel 2 höher und Sie in diesem Beispiel beide Halbwellen des Signals aus einer einzigen Versorgungsspannung speisen müssen, müssen Sie auch den Wert auch noch verdoppeln:

$$U_{\text{tt}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}} = 113{,}14\ \text{V}$$

Dieser Wert ist knapp bemessen und Sie brauchen etwas Spielraum, weil über dem Transistor ein kleiner Spannungsabfall herrscht und auch die Spannung am Filterkondensator während der Halbwellen des Ausgangssignals leicht abfällt. Als Faustregel sollte man dafür ein paar Volt hinzurechnen, so dass sich eine notwendige Versorgungsspannung von etwa 120 V ergibt. Zur Klarstellung: Es handelt sich hier nur um ein Papierdesign, und wir müssen uns keine Gedanken darüber machen, ob es tatsächlich möglich wäre, einen für dieses Beispiel geeigneten Transistor zu finden.
Sie sollten dann den Arbeitspunkt so einstellen, dass die Spannung über dem Emitterwiderstand die Hälfte der Versorgungsspannung beträgt. Für die Verlustleistung sowohl im Emitterwiderstand als auch im Transistor bedeutet dies:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{(60\ \text{V})^2}{4\ \Omega} = 900\ \text{W}$$

Mit anderen Worten: Selbst wenn der Verstärker keine Leistung an den Lautsprecher abgibt, ergibt sich eine Gesamtverlustleistung von 1800 W. Das ist ziemlich viel und natürlich völlig inakzeptabel.

Im Gegentakt: Der Klasse-C-Verstärker

Die Verlustleistung kann beträchtlich reduziert werden, indem zwei Transistoren verwendet werden, die jeweils die alternierenden Halbwellen des Eingangssignals verarbeiten.
In der Schaltung in **Bild 3** verstärkt der NPN-Transistor die positiven Halbwellen des Signals und der PNP-Transistor die negativen Halbwellen. Diese Schaltung wird als Klasse-C-Verstärker bezeichnet und hat leider einen gravierenden Mangel: Beide Transistoren schalten ab, wenn der Pegel des Eingangssignals unter der Durchlassspannung von 0,7 V an den Basis-Emitter-Verbindungen liegt. Dies führt zu starken Verzerrungen des Verstärkerausgangssignals.

Der Klasse-B-Verstärker

Dieses Manko des Klasse-C-Verstärkers lässt sich leicht umgehen, indem man an die Basis jedes Transistors eine Vorspannung (Bias) anlegt. In der Schaltung in **Bild 4** werden dazu zwei Dioden verwen-

det. Die Spannung an jeder dieser Dioden ist gleich der Basis-Emitter-Vorwärtsspannung des entsprechenden Transistors. Ein echter Klasse-B-Verstärker hat keinen Ruhestrom, so dass jeder Transistor nur während seiner jeweiligen Halbwelle des Sinussignals leitet. Allerdings verhält sich ein Transistor knapp oberhalb der Basis-Emitter-Vorwärtsspannung alles andere als linear, was in der Praxis immer noch zu erheblichen Verzerrungen führt. Dem kann entgegengewirkt werden, indem an die Basis jedes Transistors eine etwas höhere Vorspannung angelegt wird, was zu einem entsprechenden Ruhestrom führt. Ein typischer Wert liegt bei etwa 1 % des maximalen Ausgangsstroms. Im vorliegenden Beispiel haben wir einen Ausgangsstrom von 10 A angenommen, so dass der Ruhestrom etwa 100 mA betragen würde.
Der Ruhestrom wird in der Regel dadurch erreicht, dass man ein Trimmpotentiometer in Reihe mit den beiden Dioden schaltet und es entsprechend einstellt. Die Emitterwiderstände sind für die Temperaturstabilität der Schaltung unerlässlich. Wenn sich die Transistoren erwärmen, steigen die Basisströme (und damit die Kollektorströme) bei konstanter Basis-Emitter-Spannung stark an, wodurch die Transistoren noch heißer werden und der Strom weiter steigt. Dieser Teufelskreis setzt sich fort, bis die Transistoren ausfallen. Aus diesem Grund ist es notwendig, Ausgangstransistoren und Dioden auf demselben Kühlkörper zu montieren, so dass die Durchlassspannung der Dioden mit steigender Temperatur abnimmt. Die Emitterwiderstände dienen dazu, die Basis-Emitter-Spannung zu reduzieren.
Emitterwiderstände sind auch unentbehrlich, wenn mehrere Ausgangstransistoren parallel geschaltet sind, um eine höhere Maximalleistung zu erreichen, damit die Verlustleistung gleichmäßig auf die Transistoren verteilt wird.
Apropos Verlustleistung: Die Verlustleistung im Ruhezustand (ohne Signal) wird durch den Wert des Ruhestroms bestimmt. Die Formel für einen einzelnen Transistor lautet:

$$P = U \cdot I = 60\ \text{V} \cdot 0{,}1\ \text{A} = 6\ \text{W}$$

Dies ist wirklich vernachlässigbar im Vergleich zur Verlustleistung eines Klasse-A-Verstärkers, selbst wenn man bedenkt, dass man den Wert von 6 W verdoppeln muss, weil man ja zwei Transistoren in der Schaltung hat.
Es ist einfach, die Gesamtverlustleistung zu berechnen, indem man die Ausgangsleistung von der Leistungsaufnahme des Verstärkers abzieht.

$$P_{\text{in}} = U \cdot I = 60\ \text{V} \cdot 10\ \text{A} = 600\ \text{W}$$

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} + P_{\text{quiescent}} = 600\ \text{W} - 400\ \text{W} + 12\ \text{W} = 212\ \text{W}$$

Man beachte, dass der zur Berechnung der Leistungsaufnahme verwendete Wert von 60 V anstelle von 120 V tatsächlich korrekt ist, da ja jeder der beiden Transistoren nur die Hälfte der Zeit leitet). Leider spiegelt die obige Beispielrechnung die Realität nicht genau wider, da wir hier einen sehr niedrigen Wert für die Versorgungsspannung angenommen haben. In diesem Fall beträgt die Differenz zwischen der Versorgungsspannung und der maximalen Ausgangsspannung weniger als etwa 3,6 V. Das Doppelte dieses Wertes wäre praxisnäher, zumindest wenn wir vermeiden wollen, die Filterkondensatoren im Netzteil lächerlich groß zu machen. Wenn wir dies berücksichtigen, steigt die maximale Verlustleistung auf 248 W. Beachten Sie, dass wir hier nur sinusförmige Signale annehmen. Das absolute Maximum der Verlustleistung tritt aber bei einem Rechteck-Ausgangssignal mit einer Amplitude auf, die der halben Versorgungsspannung entspricht. Unter dieser Bedingung kann die Verlustleistung bis zu 264 W betragen, das sind 6 % mehr.

RG – 230533-02

Die Artikelreihe „Aller Anfang …“ gründet auf dem Buch „Basiskurs Elektronik“ von Michael Ebner, erschienen im Elektor-Verlag.

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Wenn Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel haben, wenden Sie sich bitte an die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.

Passende Produkte

- **B. Kainka, Elektronik-Grundlagen und Einsteiger-Projekte (Elektor, 2020)**
  Buch (kartoniert): https://elektor.de/19035
  E-Buch: https://elektor.de/19036



wheel.me Genius 2



wheel.me hat das erste autonome Wheel der Welt erfunden, das alles mühelos in einen autonomen Roboter verwandelt.

Maximale Flexibilität
Unendliche Einsatzmöglichkeiten, keine Änderung der Infrastrukturen erforderlich

Robotics-as-a-Service
All-in-One-Paket, keine hohen Vorlaufkosten, flexible Laufzeiten

Innovativer Preismodell
Geringes Risiko, niedriger Preis und sofortige Rentabilität der Investition

Einfache Navigation
Dynamische Hinderniserkennung, omnidirektionale Bewegung und Fokus auf Sicherheit



www.wheel.me

wheel_me

Von unserer Partnerzeitschrift
Elettronica In
ELETTRONICA APPLICATA
elettronicain.it

Mini-Reflow-Platte

Für die Bestückung und die Reparatur kleiner SMD-Schaltungen

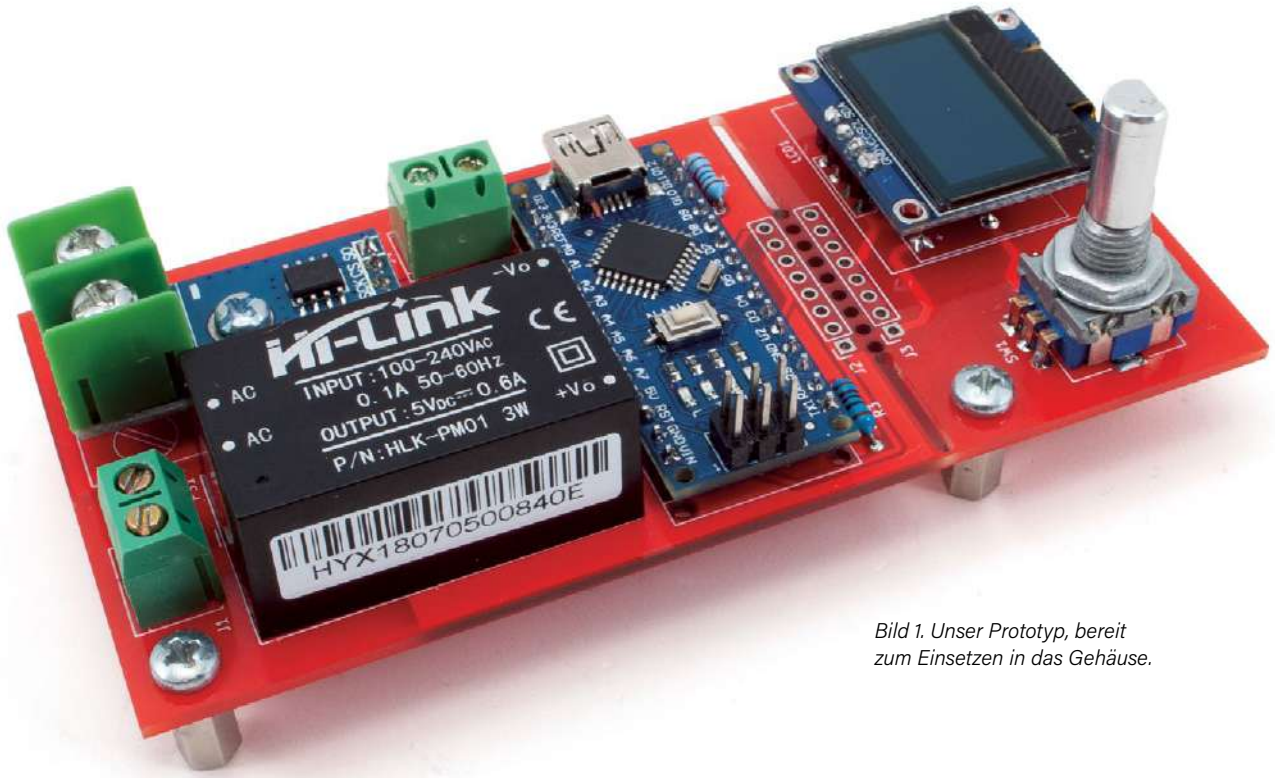


Bild 1. Unser Prototyp, bereit zum Einsetzen in das Gehäuse.

Von Massimo Divito (Italien)

Wenn man dazu übergeht, kleine SMD-Bauteile zu verarbeiten, beginnt für viele eine Zeit der Schwierigkeiten bei der Platinenbestückung, die es zu überwinden gilt. Neben der nicht ganz einfachen Platzierung der Bauteile müssen für den Lötvorgang bestimmte Temperaturen und Zeitvorgaben eingehalten werden. Da professionelle Reflow-Lötstationen teuer sind, stellen wir in diesem Artikel eine effektive und dennoch preisgünstige Lösung für die Bestückung/Reparatur unserer Platinen vor.

Im Vergleich zu bedrahteten Bauteilen für Durchsteckmontage (Through Hole Technology, THT) kann die Arbeit mit Bauteilen für Oberflächenmontage (Surface Mounted Technology, SMT), auch SMD genannt, recht anspruchsvoll sein. Sie erfordert ein scharfes Auge, eine sehr ruhige Hand, einen Lötkolben mit geeigneter Spitze und - vielleicht am wichtigsten - eine Menge Geduld.
Wenn in einer Schaltung viele oberflächenmontierte Bauteile vorhanden sind und vor allem, wenn es sich um Chips mit vielen Pins handelt, wird die Situation noch komplizierter, vor allem, wenn viele Bauteile dicht beieinander liegen: Die Verwendung eines Lötkolbens kann in diesem Fall unpraktisch bis gefährlich werden. Aus diesem Grund haben wir uns eine einfache Konstruktion ausgedacht, die den Bedürfnissen einer solchen Montagetechnik und gleichzeitig einem knappen Budget gerecht wird.
Im professionellen Bereich werden SMDs im Reflow-Verfahren gelötet, wofür normalerweise Öfen verwendet werden. Wir haben stattdessen an eine beheizte Platte gedacht, die für kleinere Schaltungen geeignet ist, wenig Platz in unserem Labor einnimmt und bei Bedarf auch als Vorheizung für Löt- und Entlötarbeiten mit einer Heißluftstation verwendet werden kann.
Reflow-Löten ist ein Verfahren, bei dem anstelle der normalen Zinn/Blei-Legierung (oder bleifreiem Lot für ROHS-konforme

Anwendungen) eine Lötpaste, bestehend aus einer pulverförmigen Zinnlegierung und flüssigem Flussmittel, verwendet wird, um Bauteile auf die Leiterplatte zu löten.
Die Lötpaste wird entweder mit einer Spritze oder einer speziellen Schablone auf die Pads der Leiterplatte aufgetragen. Danach werden zunächst alle elektronischen Bauteile platziert und schließlich wird die gesamte Baugruppe einer kontrollierten Wärmebehandlung unterzogen, bei der die Legierung schmilzt und die Bauteile dauerhaft verlötet werden.

Wie funktioniert es?

Unsere Konstruktion besteht aus einer Aluminiumplatte mit elektrischen Widerständen, die mit 230 V betrieben werden und die Platte erhitzen. Die zu lötende Platine wird auf diese Platte gelegt. Die Widerstände werden von einem Halbleiterrelais ein- und ausgeschaltet, das wiederum von einer Arduino Nano-basierten Schaltung gesteuert wird, die auf der vollständig montierten Platine in **Bild 1** zu sehen ist. An eine Klemme der Schaltung wird ein Thermoelement vom Typ K angeschlossen, das auf die Platte geschraubt ist und ständig die Temperatur misst.
Die Steuerung der Elektronik erfolgt über einen Drehgeber, mit dem man zwischen drei verschiedenen Betriebsarten wählen kann: ein Temperaturprofil für Zinnlegierungen mit Blei, eines für bleifreie Legierungen und im dritten Modus kann die Platte auf eine feste Temperatur eingestellt werden. Diese Funktion ist nützlich, um zum Beispiel eine Schaltung vorzuwärmen, um sie für die Arbeit mit einem Heißluft-Lötkolben gefügig zu machen. Wir haben ein kleines 0,96-Zoll-OLED-Display hinzugefügt, auf dem wir das gewünschte Profil auswählen und das während der Reflow-Phasen die eingestellte Temperatur, die von der Platte erreichte Temperatur sowie die verbleibende Zeit bis zum Abschluss des Prozesses anzeigt. Wie bereits erwähnt, ist es für die korrekte Durchführung des Lötvorgangs notwendig, eine genaue Temperaturkurve einzuhalten, damit die Lötpaste richtig schmilzt und gleichzeitig die Bauteile nicht durch zu viel Hitze beschädigt werden. In der Regel gibt jeder Hersteller für seine Bauteile eine optimale Temperaturkurve an.
Der gesamte Lötvorgang ist in vier Phasen unterteilt:

- Vorheizen: Die Bestandteile der Lotpaste beginnen zu schmelzen.
- Einweichen: Die Bestandteile schmelzen vollständig; das Flussmittel wird flüssig und reinigt die Pads.
- Reflow: Der Metallanteil des Lots ist geschmolzen und schafft eine dauerhafte mechanische und elektrische Verbindung zwischen den Bauteilen und der Leiterplatte. Das Flussmittel verdampft.
- Abkühlung: Das Zinn kühlt ab und erstarrt.

Um dies zu erreichen, muss man zu jedem Zeitpunkt des Schmelzvorgangs die Temperaturen kennen, die die Platte hat und haben sollte. Da die Temperatur der Platte (**Bild 2**) etwa alle 250 ms gemessen und ausgewertet wird, müssten wir für ein einziges Profil von 380 s 1520 Temperaturwerte kennen (380.000/250). Die Speicherung und der Zugriff auf so viele Werte wäre auf Firmware-Ebene jedoch ziemlich kompliziert und jede künftige Änderung umständlich. Außerdem verdoppelt sich die Anzahl der Werte, da es ja zwei Profile gibt (wir könnten sogar noch mehrere hinzufügen, wenn wir wollten). Deshalb sind wir zu einer alternativen Lösung gekommen, bei der wir nur einige der Temperaturen definieren und darüber die restlichen Werte berechnen.
Wenn wir uns die Temperatur/Zeit-Kurven der Profile in **Bild 3** ansehen, stellen wir fest, dass die Temperaturveränderungen sowohl nach oben als auch nach unten linear sind. Wir können daher jedes Profil in mehrere Segmente unterteilen, von denen wir nur zwei Wertepaare am Anfang und am Ende des Segments kennen müssen. Jedes Paar besteht aus den Werten der Sekunden und der Temperatur. Diese Werte lassen sich leicht in einem zweidimensionalen Array speichern, das aus sechs Elementen besteht: den sechs Anfangs- und Endwerten, die das Profil genau beschreiben.
Wenn wir also den Temperaturwert wissen wollen, der zu einem bestimmten Zeitpunkt auf der Platte erreicht werden soll, müssen wir nur die Methode der linearen Interpolation anwenden, mit der wir einen unbekannten Wert zwischen zwei bekannten

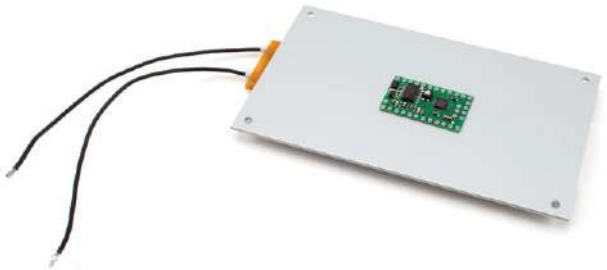


Bild 2. Zum Löten kann eine Platine auf die beheizte Platte gelegt werden, nachdem die Lötpaste auf die Pads aufgetragen wurde.



Bild 3. Temperaturkurven für das Löten mit bleihaltigen und bleifreien Legierungen.

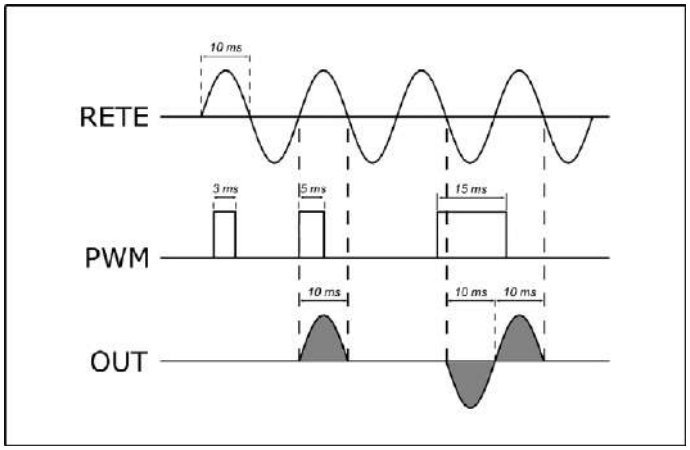


Bild 4. Funktionsprinzip des PWM-gesteuerten Nulldurchgangs-Triggerverfahrens (RETE = Netzspannung).

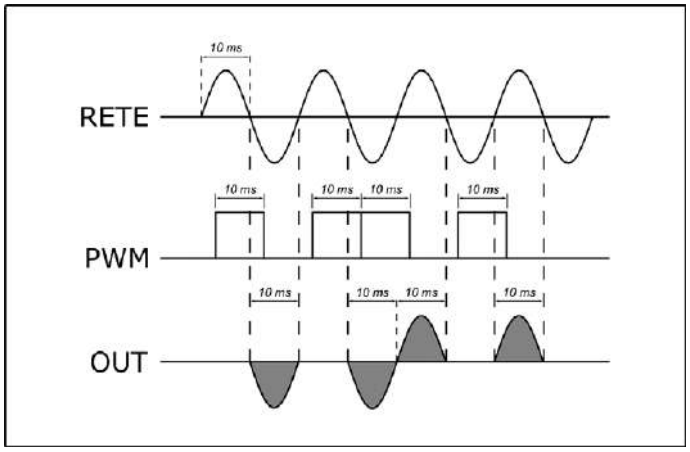


Bild 5. Verhalten des Nulldurchgangs-Triggerverfahrens mit PWM bei 1 Hz (RETE = Netzspannung).

Werten extrapolieren können. Wenn wir die Solltemperatur und die Ist-Temperatur zu einem Zeitpunkt kennen, können wir die Platte entsprechend ein- oder ausschalten. Um die Temperatur möglichst genau an die Vorgaben des Profils anzupassen, verwenden wir eine PID-Regelung. Dabei wird eine Größe einfach durch ständige Überwachung und Einwirkung auf bestimmte Variablen angepasst, wobei versucht wird, sie nahe am Sollwert zu halten. Natürlich ist die PID-Regelung nicht so trivial, denn sie folgt präzisen mathematischen Formeln. Glücklicherweise gibt es spezielle Bibliotheken für Arduino, mit denen sich eine PID-Regelfunktion einfach realisieren lässt.

Wie bereits erwähnt, verwenden wir zum Einschalten der Platte ein Halbleiterrelais, das einen Nulldurchgangs-Trigger besitzt. Das bedeutet, dass der Ausgang nur dann von „ein“ auf „aus“ und umgekehrt geschaltet wird, wenn die 50-Hz-Netzspannung den Nullpunkt durchläuft. Dies bedeutet auch, dass von dem Zeitpunkt, an dem wir den Eingang des Relais ein- oder ausschalten, bis zu dem Zeitpunkt, an dem es die Last tatsächlich ein- oder ausschaltet, einige Millisekunden vergehen können.

Es ist klar, dass diese Besonderheit keine genaue Kontrolle des Ausgangs ermöglicht. Wenn wir das Relais vielleicht eine Millisekunde nach dem Nulldurchgang mit einem Impuls mit einer Dauer von weniger als einer Halbwelle ansteuern, wird die Last nicht eingeschaltet. Wenn wir dagegen den Impuls genau im Nulldurchgang senden, schalten wir die Last zwar ein, aber erst beim nächsten Nulldurchgang wieder aus. Nehmen wir **Bild 4** als Beispiel: Nach einer PWM, die das Relais für insgesamt 23 ms angesteuert hat, ist der Ausgang für insgesamt 30 ms aktiv. Eine Lösung wäre es, einen Nulldurchgangsdetektor einzusetzen, der, wie der Name schon sagt, alle Zeitpunkte des Nulldurchgangs der Netzspannung erkennen kann, um den PWM-Ausgang mit der Netzspannung zu synchronisieren, doch um die Schaltung nicht weiter zu verkomplizieren, haben wir das Problem mit einer sehr niedrigen PWM-Frequenz gelöst, genauer gesagt mit 1 Hz. Auf diese Weise erhalten wir eine Gesamtperiode von 1.000 Millisekunden, unterteilt in 100 Schritte zu je 10 Millisekunden. In der Praxis ergibt sich für jede einprozentige Änderung des Tastverhältnisses eine Änderung der Impulslänge von 10 ms, was genau der Dauer einer Halbwelle der Netzfrequenz entspricht. Auf diese Weise wird der von uns eingestellte Wert für die Einschaltdauer korrekt an den Ausgang des Relais weitergeleitet, da wir sicher sind, dass die gleiche Verzögerung, die für das Einschalten der Last gilt, auch für ihre Deaktivierung angewendet wird, mit dem einzigen Unterschied, dass eine Verzögerung von 1…9 Millisekunden möglich ist, die die gesamte Welle nach vorne verschiebt (**Bild 5**). Bei dieser Konstruktion gibt es nur einen Modus zur Regulierung der Erwärmung, während die Abkühlung auf natürliche Weise durch Wärmeabgabe erfolgt. Daher stimmt die tatsächliche Kurve nicht mit der theoretischen Kurve überein, und vieles hängt auch von der Umgebungstemperatur ab. Wir können Sie aber versichern, dass wir nach etlichen Versuchen nie Probleme hatten, den Reflow-Prozess mit hervorragenden Ergebnissen abzuschließen.

Verdrahtung

Dank der Verwendung des Arduino (U1) ist die Schaltung (**Bild 6**) sehr einfach, denn außer ihm befindet sich nur noch ein Modul mit einem MAX6675 an Bord. Dieses Modul verstärkt das Signal des an den Klemmen des Moduls angeschlossenen K-Thermoelements, wandelt es von analog nach digital um und gibt es über die SPI-Schnittstelle aus. Das ist sehr praktisch, denn das Auslesen dieses Signals über die Analogeingänge des Arduinos wäre kompliziert, da die Amplitude im Mikrovoltbereich liegt (und daher entsprechend verstärkt werden müsste) und elektrisches Rauschen die Messung beeinflussen könnte. Aus diesem Grund haben wir uns für den MAX6675 mit Digitalausgang entschieden, der zudem, weil nur in als SMD erhältlich ist, auf einem besser handhabbaren Breakout-Board BRD1 im Handel ist.

Die Signale des Thermoelements werden also umgewandelt und über die SCK-, CS- und SO-Pins an die digitalen Eingänge des Arduino gesendet, der sie verarbeitet und entscheidet, ob die Temperatur der Platte erhöht oder gesenkt werden soll. Über den Ausgang J4 steuert der Arduino das Halbleiterrelais (SSR-25-DA von Fotek, für Lasten bis zu 25 A) an, das das Heizelement der Platte mit Energie versorgt. Der Widerstand R1 hat die gleiche Funktion wie bei der Ansteuerung einer LED, denn im Eingangsbereich des Relais steckt ein Opto-Isolator. Das Relais ist im gleichen Gehäuse wie die Platte untergebracht und taucht deshalb im Schaltplan nicht auf.

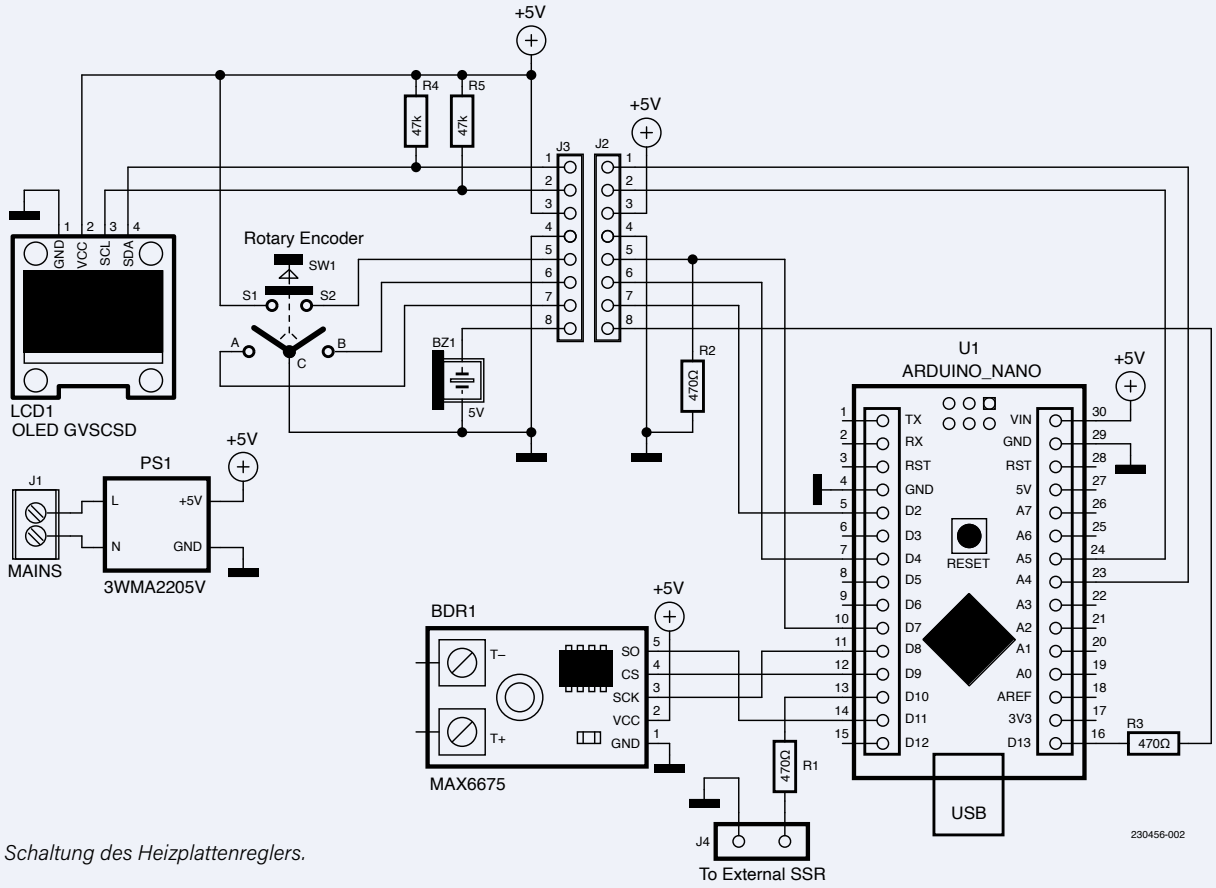
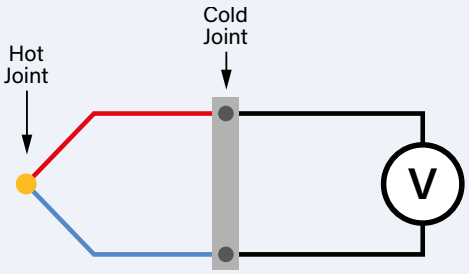


Bild 6. Schaltung des Heizplattenreglers.

Das Thermoelement



Thermoelemente sind Temperaturmessfühler, die in der Industrie, der Wissenschaft, im Ingenieurwesen und in vielen anderen Bereichen eingesetzt werden. Aufgrund ihrer geringen Größe und ihrer schnellen Ansprechzeit können sie auch in besonders kritischen Umgebungen eingesetzt werden, da sie in der Lage sind, einen großen Temperaturbereich genau zu messen. Ein großer Vorteil ist, dass sie sehr einfach, langlebig und kostengünstig sind. Thermoelemente sind für die Messung hoher Temperaturen von physischen Körpern, Bauteilen und Substanzen konzipiert.

Jedes Thermoelement besteht aus zwei verschiedenen Metallteilen, die an einem Punkt verbunden sind, der als „heiße Verbindung" (hot junction) bezeichnet wird. Dieser Punkt wird mit dem Gegenstand oder der Substanz, deren Temperatur gemessen werden soll, in Kontakt gebracht. Das andere Ende mit den beiden freien Drähten wird als „Kaltstelle" (cold junction) bezeichnet. Schießt man diese an ein Voltmeter an, erzeugt der Temperaturunterschied zwischen den beiden Verbindungsstellen eine zur Temperatur proportionale Potentialdifferenz (Seebeck-Effekt). Thermoelemente können äußerlich zwar sehr unterschiedlich aussehen, funktionieren aber im Grunde alle nach demselben Prinzip. Die Kaltstelle entsteht durch den Unterschied zwischen dem Metall der Thermoelementdrähte und dem der Anschlussdrähte.

Es gibt verschiedene Arten von Thermoelementen, aber der „Typ K" ist definitiv die in der Industrie am häufigsten verwendete. Es besteht aus einer Kombination von Drähten auf Nickelbasis und hat einen Messbereich von -200 °C bis +1.260 °C. Aufgrund der Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit von Nickel kann es in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden.

Die Entscheidung für ein solches Halbleiterrelais wird von der Tatsache diktiert, dass es mit PWM betrieben wird, das heißt, durch eine Folge von Impulsen, die die Platte mehrmals pro Sekunde ein- und ausschaltet. Ein gewöhnliches elektromechanisches Relais hätte nicht nur nicht die erforderliche Schaltgeschwindigkeit, es würde auch nicht lange halten, da seine Kontakte durch Lichtbögen schnell irreparabel beschädigt wären.

An die SDA- und SCL-Pins des Arduino haben wir LCD1 angeschlossen, ein kleines Ein-Zoll-Display auf der Basis des SSD1306-Chips, und die Pull-up-Widerstände R4 und R5 hinzugefügt. Außerdem haben wir den Quadratur-Drehgeber SW1, dessen Pin A und Pin B mit den digitalen Eingängen von U1 verbunden sind. Wie man im Schaltplan sehen kann, haben wir keine externen Pull-up-Widerstände vorgesehen, sondern die im Mikrocontroller befindlichen per Software aktiviert, während der C-Anschluss fest mit GND verbunden ist. Der Taster auf der Geberwelle, der auf der einen Seite mit Vcc und auf der anderen Seite mit Pin 10 von U1 verbunden ist (zusammen mit dem Pull-down-Widerstand R2), ermöglicht verschiedene Auswahlen.

Schließlich gibt es noch den Summer BZ1, der über den Widerstand R3 an Pin 9 von U1 angeschlossen ist. Die gesamte Schaltung wird über das PS1-Modul versorgt, einem AC/DC-Wandler von *Hi Link*, der direkt auf der Platine montiert wird. Dieses Modul besitzt einen 230-V-Wechselspannungseingang und liefert stabile 5 V/600 mA am Ausgang. Diese Lösung erspart uns die externe Stromversorgungen und ermöglicht es, die gesamte Schaltung in einem einzigen Gehäuse unterzubringen.

Firmware

Der Arduino-Sketch, der unter [1] heruntergeladen werden kann, ist recht umfangreich, so dass wir hier nur auf einige Teile eingehen, die für das Verständnis direkt relevant sind und die es Ihnen ermöglichen, das Projekt Ihren Wünschen anzupassen. In einem ersten Schritt binden wir die vier verwendeten Bibliotheken ein:

- Display (*U8g2* von Oliver)
- MAX6675 (*MAX6675_Thermocouple* von Yurii Salimo)
- PID (*PID* von Brett Beauregard)
- PWM (*https://github.com/maxint-rd/FastPwmPin*)

Als nächstes werden die Pins, die mit dem MAX6675 und dem Drehgeber verbunden sind, sowie zwei benutzerdefinierte Grafiksymbole definiert, die das Thermometersymbol auf dem Display bilden werden. In den Deklarationen definiert das Array `profiles` die beiden Lötprofile:

```
int profiles [2][6][2] = {
{{0, 0}, {60, 150}, {180, 150}, {240, 225},
    {260, 225}, {380, 0}}, // Lead profile
{{0, 0}, {60, 150}, {180, 180}, {240, 255},
    {255, 255}, {320, 0}} // Lead-free profile
};
```

Hier müssen Sie eingreifen, wenn Sie ein Profil ändern oder eines hinzufügen wollen, indem Sie die Werte des Arrays entsprechend ändern und sich daran erinnern, dass sich für jedes Wertepaar der erste Wert auf die Zeit in Millisekunden und der zweite auf die Temperatur in Celsiusgrad bezieht. Die Tabellen in Bild 3 verdeutlichen das Konzept. Nach diesem Array folgt ein weiterer Block von Variablen, deren Änderung Sie vielleicht für sinnvoll halten:

```
int tempMinPreheater = 60;
    //set the minimum temperature that
    // can be set as a preheater
int tempMaxPreheater = 250;
    //set the maximum temperature
    // that can be set as the preheater
int tempStepPreheater = 5;
    // set the value of the setting
    // steps for the preheater
int tempAmbient = 50;
    //set the maximum ambient temperature,
    // if the plate is warmer, the
    // remelting process cannot be started
int tempAdjust = 0;
    //correction of the
    // temperature read by the probe
```

Alle diese Codezeilen sind mit Kommentaren versehen, so dass leicht zu erkennen ist, dass die ersten beiden die Mindest- und Höchstwerte angeben und die dritte den Wert angibt, der bei jeder Umdrehung des Encoders zu den eingestellten Graden addiert oder von ihnen subtrahiert wird. Diese Werte beziehen sich nur auf die Vorwärmfunktion. Die Variable `tempAmbiente` gibt den maximalen Wert an, den die Platte haben kann, bevor der Schmelzvorgang beginnt, und wird als Raumtemperatur bezeichnet, da die Platte normalerweise die Temperatur ihrer Umgebung annimmt. Auf diese Weise wird vermieden, dass ein Lötvorgang unmittelbar nach Beendigung eines anderen gestartet wird. In diesem Fall würde nämlich die Reflow-Kurve verzerrt werden, was die Gefahr birgt, dass das gesamte Verfahren misslingt. Die Variable `tempAdjust` wird zur Korrektur der gemessenen Plattentemperatur verwendet. Der Rest des Sketches bedarf kaum eines Kommentars. Das Auslesen der Tasten und des Encoders erfolgt ohne Interrupts: Um das lange Drücken von P1 auszulesen und die Anzeige periodisch zu aktualisieren, werden stattdessen ein paar Timer verwendet. Im Code, der die Reflow-Funktionalität behandelt, können wir sehen, wie die Formel der lineare Interpolation verwendet wird, um zu berechnen, auf welche Temperatur die Platte gesetzt werden muss:

```
reflowNowTime = (unsigned long)(millis() - reflowStartTime);
    // Calculates how many milliseconds
    // the reflow cycle started;
for (int i = 0; i < 6; i++) {
  if ((reflowNowTime >=
        (profiles[profile][i][0] * second)) &&
        ( reflowNowTime <
              (profiles[profile][i + 1][0] * second)) {
    xa = profiles[profile][i][0] * second;
    xb = profiles[profile][i + 1][0] * second;
    ya = profiles[profile][i][1];
    yb = profiles[profile][i + 1][1];
    tempTarget = ((((reflowNowTime - xa) *
                    (yb - ya)) / (xb - xa)) + ya;
    // y0=( ( (x0-xa)*(yb-ya) ) / (xb-xa) ) + ya
    // Linear interpolation formula

    phaseActual = i;
    ruleHeater();
  }
}
```

In der `for`-Schleife blättern wir durch das Array der Profile, um die bekannten Werte auf der x-Achse (Millisekunden) und auf der y-Achse (Grad Celsius) zu finden. Auf diese Weise erhalten wir die Werte `xa`, `ya`, `xb`, `yb`, wobei `x0` den Millisekunden entspricht, die seit Beginn der Reflow-Phase vergangen sind. Mit diesen Werten können wir `y0` berechnen, das den Temperaturwert darstellt, der für unsere Heizplatte eingestellt werden muss.

Praktische Umsetzung

Für das Steuergerät wurde eine spezielle Platine entworfen, die den Zusammenbau erleichtert und die Elektronik kompakt und übersichtlich macht. Diese Platine bietet die Möglichkeit, den Geber- und Anzeigeteil abzutrennen, um den Einbau in einer Vielzahl von Gehäusen zu ermöglichen. Falls Sie sich für eine



Bild 7. Das komplette System einschließlich des Thermoelementes, das mit der Ösenklemme angeschraubt wird.

Trennung der Platine entscheiden, müssen Sie natürlich die beiden Teile über die Anschlüsse J2 und J3 verbinden. Der optimale Ort für die Platine(n) ist ein Kunststoffgehäuse, das eine berührsichere Isolierung ermöglicht, zum Beispiel ein Elektroinstallationskasten, dessen Deckel für das Display und den Drehgeber entsprechend gebohrt ist.

Da Netzspannung im Spiel ist, könnte man das Halbleiterrelais und die 230-Volt-Steckdose für den Plattenanschluss und das K-Thermoelement mit in die Schaltung einzubeziehen. Um eine genaue Temperaturmessung zu ermöglichen, ist es wichtig, den Fühler richtig zu positionieren und ihn vielleicht mit einer Metallhalterung fest an der Heizplatte zu verankern. **Bild 7** zeigt eine Lösung, bei der eine Ringöse auf die „Hot Junction" gesteckt und, ohne den Druck zu übertreiben, gequetscht wurde. Auf diese Weise kann das Thermoelement mit einer einfachen Schraube an der Platte verankert werden, wobei der mechanischen Verbindung vielleicht etwas Wärmeleitpaste hinzugefügt werden kann, wie sie für PC-Prozessoren verwendet wird. Eine andere Möglichkeit wäre, die heiße Verbindung in ihrem Naturzustand zu belassen und bei jedem Reflow-Einsatz mit einem Stück Hochtemperaturband (Kaptonband) auf die zu lötende Leiterplatte zu kleben.

Warnung: Seien Sie bei der Verdrahtung wie immer, wenn Netzspannung im Spiel ist, vorsichtig und sorgfältig. Vergessen Sie nicht, den Schutzleiter mit allen Metallteilen des Geräts, einschließlich der Platte zu verbinden.

Kalibrierung und erster Einsatz

Nachdem der Arduino programmiert und das Projekt zusammengebaut wurde, können wir nach sorgfältiger Überprüfung der Verkabelung (insbesondere der 230-V-Verkabelung) die Schaltung einschalten und ihren ordnungsgemäßen Betrieb überprüfen. Vor dem ersten praktischen Einsatz ist es jedoch sinnvoll, eine einfache, aber effektive Kalibrierung durchzuführen. In der Praxis kann es je nach Platzierung des K-Thermoelements zu geringfügigen Abweichungen kommen, was auf die Anordnung der Heizwiderstände zurückzuführen ist, die in der Regel mittig angeordnet sind, und genau dort erhalten wir eine genauere Messung. Wenn wir den Sensor an einer anderen Stelle anbringen, dürften die Messwerte kleine Unterschiede aufweisen, die mit zunehmender Entfernung von der Wärmequelle größer werden.

Um die gemessene Temperature zu korrigieren, haben wir die Variable `tempAdjust` vorgesehen, die standardmäßig auf null eingestellt ist. Wenn Sie eine Möglichkeit haben, die Temperatur der Platte mit einem Infrarot- oder einem anderen genauen Thermometer abzulesen, können Sie die von unserer Schaltung abgelesene Temperatur und die mit dem Thermometer gemessene überprüfen. Den Wert, der sich aus der Differenz zwischen den beiden Werten ergibt, müssen Sie der oben genannten Variablen zuweisen. Auf diese Weise können Sie den Messwert auf einen Wert korrigieren, der näher am tatsächlichen Wert liegt. Sobald dies geschehen ist, können Sie endlich Ihre Schaltungen löten. Damit Sie sich mit der

Lineare Interpolation



In der Mathematik bezeichnet Interpolation eine Methode zur Ermittlung neuer Punkte in der kartesischen Ebene aus einer endlichen Menge von Datenpunkten. Auf diese Weise ist es möglich, den Verlauf einer Kurve näherungsweise zu bestimmen, auch wenn man nur einige wenige Punkte der Kurve kennt. Bei der linearen Interpolation, die die einfachste Methode der Interpolation darstellt, benötigt man nur zwei benachbarte Punkte, die durch (xa, ya) und (xb, yb) festgelegt sind, die man verbindet, um ein Segment der Kurve zu zeichnen.

Zur Berechnung des Punktes (x0, y0), der zwischen den bekannten Punkten liegt, verwenden wir daher die Formel:

$$y0 = \frac{(x0 - xa)(yb - ya)}{xb - xa} + ya$$

Wollen wir im Bild den Wert von y0 bei x0 = 20 wissen, setzen wir die einfach Punkte des ersten Segments (0,0) und (60,150) in die Formel ein:

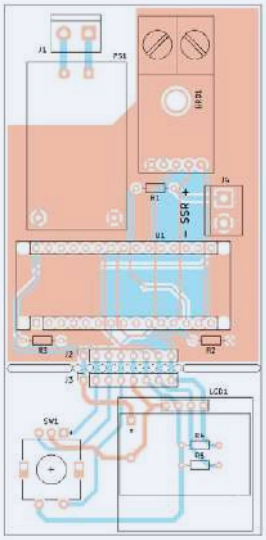
$$y0 = \frac{(20 - 0)(150 - 0)}{60 - 0} + 0$$

$$y0 = \frac{20 * 150}{60}$$

$$y0 = \frac{3000}{60}$$

$$y0 = 50$$

Stückliste



Widerstände:
R1...R3 = 470 Ω
R2 = 10 k
R4...R5 = 47 k

Module:
U1 = Arduino Nano
PS1 = HLK-PM01 (Hi-Link-Netzteilmodul)
BRD1 = MODMAX6675 (für Thermoelemente vom Typ K)
LCD1 = OLEDGVSCSD (0,96" OLED)

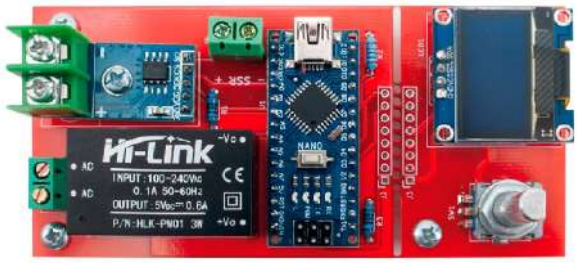
Außerdem:
BZ1 = 5-V-Summer (ohne Oszillator)
J1, J4 = 1x2-polige Platinenanschlussklemme, Raster 5 mm
J2, J3 = 1x8-polige Stiftleiste, Raster 2,54 mm (optional)
1 St. 1x4-polige Buchsenleiste, Raster 2,54 mm, für Display
2 St. 1x15-polige Buchsenleiste , Raster 2,54 mm, für Arduino Nano
1 St. 1x5-polige Buchsenleiste, Raster 2,54 mm, für MODMAX6675
Drehgeber mit Drucktaster

Dosierung an Lötpaste, die Sie auf die Leiterbahnen auftragen müssen, und mit der richtigen Positionierung der Bauteile vertraut machen, empfehlen wir Ihnen jedoch, mit kleinen Platinen zu beginnen, zum Beispiel mit kleinen SOIC-DIL-Adaptern.

Praktische Anwendung

Neben der Verwendung für das Reflow-Löten kann diese Konstruktion auch als Leiterplattenvorwärmer beim Löten und Entlöten mit der Heißluftstation eingesetzt werden. Im letzteren Fall sollte die Leiterplatte auf etwa 150 °C gebracht werden, wenn die zu lötenden Bauteile mit der Heißluftstation erhitzt werden und Flussmittel und Lot schmelzen.

RG – 230456-02



Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Bitte schreiben Sie an die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.

Passende Produkte

- **Aufgerüsteter T-962 Infrarot-Reflow-Ofen (Elektor-Version)**
  SKU 20346: www.elektor.de/20346
- **2-in-1 SMD-Heißluft-Rework-Station ZD-8922**
  SKU 20141: www.elektor.de/20141

WEBLINK

[1] Software Download: https://elektormagazine.de/230456-02

LPN liefert Leiterplatten aus Deutschland, vom Weltmarkt, aus NATO-Partnerländern oder mit anderen Restriktionen.

LPN ist nach ISO 9001:2015 Zertifiziert und das Personal beim FraunhoferInstitut geschult.

LPN liefert jedes Basismaterial und jede in Deutschland oder am Weltmarkt verfügbare Technik.
- Multilayer bis 56 Lagen.
- Starrflex, Flex, Semiflex.
- Aluminium, auch Bergquist, Kupferkern, Messingkern, Stahlkern.
- Teflon, auch Rogers.
- Montagehilfen Kaptonband, Abziehlack und Weiteres.

LPN Qualitätsprüfungen
- 100% Kontrolle
- Kupferstärkenmessung mit Magnetfeld Messgeräten.
- Nachmessen gedruckter Induktivitäten.
- Schliffbildauswertung.
- Lot-Benetzungs-Test.
- Delaminations-Test.
- alle Fertigungsstätten halten ISO 14001 ein.

LPN Dienstleistungen
- Datenaufbereitung incl. Nutzenaufbau,
- Machbarkeitsprüfung,
- EMPB.
- geklebte Vorlagen digitalisieren.
- Filme digitalisieren.
- Leiterplatten clonen.
- Leiterplatten nachlayouten.
- Terminaufträge.
- Abruflager für Jahreslose.

Profitieren Sie von den LPN Qualitätsstandards und den weltweiten Kontakten.

LPN Leiterplatten Nord GmbH
Hermann-Bössow-Straße 13-15
23843 Bad Oldesloe
leiterplatten-nord.de

Anfragen/Bestellungen:
lpn@lp-nord.de
Telefon 04531 1708 0

Q&A mit Alberto Savoia

Gründer und Innovationstreiber, Pretotype Labs LLC

Starte nicht mit einem Prototyp – starte mit einem Pretotyp!

Prüfe erst, ob es einen Markt für dein Produkt gibt, bevor du deinen Lötkolben vorwärmst



Von Stuart Cording (Elektor)

Wir Technik-Typen halten ein mächtiges Werkzeug in der Hand. Dank unseres Verständnisses von Elektronik und Software brauchen wir nicht viel, um uns Hightech-Lösungen für die Probleme um uns herum zu erträumen. Und von da aus ist es nur noch ein kurzer Sprung zur Gründung eines Unternehmens, das den Weltmarkt beherrscht. Was kann da schon schief gehen? Nun, eine ganze Menge.

Die meisten Quellen geben an, dass 20 % der neu gegründeten Unternehmen im ersten Jahr scheitern und 50 % bis zum fünften Jahr aufgegeben haben [1]. Die Gründe für das Scheitern reichen von rechtlichen Problemen und Burnout bis hin zum Verlust des Fokus und einem schlechten Produkt. Aber keiner dieser Gründe gehört zu den fünf wichtigsten. Unglaublich, dass nach all dem enormen Arbeits- und finanziellen Aufwand 42 % der Startups daran scheitern liegen, dass es einfach keinen Marktbedarf gibt [2]. Warum also machen Startups dieses grundlegende Element ihres Geschäftsplans so falsch? Eine Person, die sich mit dieser Frage intensiv beschäftigt hat, ist Alberto Savoia. Als ehemaliger Mitarbeiter von Sun Microsystems und Google hat er praktische Erfahrung damit, wie Startups Erfolg haben können: Er hat ein 100-Millionen-Dollar-Unternehmen mit einem Startkapital von drei Millionen Dollar aufgebaut. Aber er hat auch ein Startup gegründet, das 25 Millionen Dollar an Risikokapital erhalten hat. Elektor sprach mit Alberto über Erfolg und Misserfolg von Produkten, seine Leidenschaft für das Löten und warum jeder das Pretotyping versuchen sollte.

Stuart Cording: Wenn man sich Dein Profil ansieht, würde man sagen, dass Du hervorragend qualifiziert bist, ein erfolgreiches Startup aufzubauen. Dein drittes Startup ist jedoch gescheitert - warum?

Alberto Savoia: Nun, ich habe mich schrecklich gefühlt. In den fünf Jahren haben wir fast 100 Mitarbeiter eingestellt, die sich uns gegenüber verpflichtet haben und Aktienanteile hatten. Als es dann nicht klappte, fühlte ich mich für alle schlecht. Das hat mich motiviert, mir die Frage anzusehen und zu beantworten. Wir hatten die besten Leute eingestellt, richtig. Wir hatten die besten Risikokapitalgeber (Venture Capitalists, VC) im Silicon Valley, die 25 Millionen Dollar aufbrachten, wir hatten also jede Menge Geld. Man sagte uns, das Produkt würde funktionieren. Und wir hatten es gebaut.

Aber es war gescheitert. Was hatten wir falsch gemacht? Es stellte sich heraus, dass wir das, wie ich es nenne, falsche "Es" gebaut hatten. Es spielte keine Rolle, wie gut man es baute oder vermarktete, es würde sich nicht auf dem Markt durchsetzen. Das brachte mich zu der Frage, wie ich herausfinden kann, ob ein Produkt das richtige "Es" sein wird.

Über Alberto Savoia

Als erster Director of Engineering bei Google leitete Alberto Savoia das Team, das Google AdWords einführte. Später, in seiner Rolle als Innovation Agitator bei Google, entwickelte er das Pretotyping - ein strenges datenbasiertes System zur Validierung neuer Produktideen. Vor seiner Tätigkeit bei Google war Alberto ein erfolgreicher Serienunternehmer und der erste Direktor für Softwaretechnologieforschung bei Sun Microsystems Laboratories, wo er eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung von Java-Technologie und -Tools spielte.

Albertos Arbeit im Bereich Innovation hat ihm in der Branche viel Anerkennung und Auszeichnungen eingebracht, darunter den *Wall Street Journal Technical Innovation Award*, den *Top 25 CTOs Award* von *InfoWorld* und den *Technology of the Year Award*, ebenfalls von *InfoWorld*. Heute ist er ein gefragter Redner, Dozent und Coach, bekannt für seine Fähigkeit, Unternehmen bei der vollen Erschließung ihres Innovations- und Wachstumspotenzials zu helfen. Von seinem ersten Workshop mit dem Titel *„Entrepreneurial Innovation"* in Stanford im Jahr 2011 bis hin zu seinem aktuellen Coaching von Fortune-500-Unternehmen hat Alberto einen tiefgreifenden und nachhaltigen Einfluss auf das Produktmanagement und die Innovationspraktiken vieler führender Unternehmen weltweit ausgeübt. Sein neuestes Buch, *The Right It – Why So Many Ideas Fail and How to Make Sure Yours Succeed*, wurde 2019 bei HarperCollins veröffentlicht.

Stuart Cording: Die meisten Bücher empfehlen zwei Dinge, um ein erfolgreiches Startup zu gründen – einen soliden Geschäftsplan und ein großartiges Team. Warum ist das nicht genug?

Alberto Savoia: Ich habe etwa ein Dutzend Geschäftspläne geschrieben und ein paar hundert gesehen, während ich VCs bei der Due-Diligence-Prüfung geholfen habe. Lass mich dir sagen, dass die meisten Geschäftspläne frei erfunden sind. Ich bringe den Leuten bei, Geschäftspläne zu redigieren. Nimm drei oder vier verschiedenfarbige Stifte. Alles, was eine Vermutung ist, markiere mit dem roten Textmarker. Alles, was ein Glaube oder eine Hoffnung ist, markiere mit einem gelben Stift und so weiter. Wenn du also alles Unwichtige streichst, zum Beispiel die Erfolgsgeschichte eines anderen Unternehmens, bleibt dir höchstens eine halbe Seite Material. Der Rest ist Fiktion - vor allem die fünfjährige Finanzprognose!

Stuart Cording: Woran erkennst Du, ob die Geschäftsidee ein Treffer ist?

Alberto Savoia: Aus diesem Grund habe ich die Definition „The Right It" (das richtige Es) entwickelt: ein Produkt, das, wenn es kompetent ausgeführt wird, erfolgreich sein wird. Das bedeutet auch, dass ein falsches Produkt, egal wie gut es ausgeführt wird, auf dem Markt scheitern wird. Das ist also der erste Punkt.

Die nächste Frage lautet: Ist mein Produkt das richtige Es? Das erste, was ich tue, ist, es in einer sehr präzisen Sprache zu beschreiben. Deine Leser sind wahrscheinlich alle Ingenieure, also werden sie nicht sagen: „Ich werde einen großen Widerstand verwenden." Das ist nicht genug. Wie viele Ohm wird er haben? Wie viel Watt muss er aushalten?

Ich gehe also von einer Annahme aus, einer klaren Hypothese, und dann prüfe ich diese Hypothese. Da wir es mit Menschen und Märkten zu tun haben, gibt es keine Erfolgschancen von 0 % oder 100 %. Stattdessen arbeite ich mit Erfolgswahrscheinlichkeiten und teile unsere Chancen in fünf Bereiche ein: 10 %, 30 %, 50 %, 70 % und 90 %. Ich führe Experimente durch, prüfe, ob sich die Hypothese bestätigt, und nehme dann Änderungen vor, um zu sehen, ob wir unsere Erfolgschancen verbessern können.

Stuart Cording: Wir sprechen also davon, zunächst einen Prototyp oder ein minimal funktionsfähiges Produkt (Minimum Viable Product, MVP) zu bauen, was per Definition Zeit und (viel) Geld kostet, richtig? Oder gibt es einen besseren Weg?

Alberto Savoia: Verstehe mich nicht falsch, ich bin total zufrieden, wenn ich vor einem Lötkolben oder einem Compiler sitze. Ich baue wirklich gerne Sachen. Was ich nicht mag, ist, etwas zu bauen, das versagt, obwohl ich etwas hätte bauen können, das Erfolg hat. Um dieses Problem zu lösen, habe ich einen neuen Begriff erfunden: „Pretotyping", eine vereinfachte Version von Pretend Prototyping (also die Entwicklung eines vorgetäuschten Prototypen). Ich hatte zum Beispiel eine Idee für einen Klangregler „The Delicious One" für Audiophile, weil es einen Trend gibt, reine Verstärker zu bauen, die das Eingangssignal nicht verändern. Schließlich habe ich ihn gebaut, aber es dauerte Monate, bis er richtig funktionierte. Um sicherzugehen, dass es das richtige Es war, bevor ich anfing, habe ich einen Pretotypen entwickelt.

Ich wusste, wie es aussehen sollte, also baute ich eine große schwarze Box mit Eingängen, Ausgängen und einem schönen Drehknopf. Da war nichts drin, aber ich benutzte ihn, um Fotos zu machen und eine Website namens *deliciousdecibels.com* einzurichten, die man immer noch besuchen kann. Ich habe es auf Audiophilen-Websites in den USA beworben, und wenn mir jemand eine E-Mail schickte, teilte ich ihm mit, dass sich das Gerät noch in der Entwicklung befand und 300 Dollar kosten würde. Jetzt waren sie also mit in der Geschichte drin. Später ließ ich ihnen die Klangregelungskurven zukommen, erstellte ein Video und schrieb erneut, dass sie das Gerät für 50 Dollar vorbestellen könnten, wenn sie wollten. Mit den Vorbestellungen nahmen sich mehr Leute ernsthaft der Sache an.

So habe ich also meine eigenen Daten über den Markt für meine Klangregelung gesammelt. Nicht die Informationen über den Erfolg früherer Geräte, die so genannten OPD (Other People's Data, die Daten anderer Leute), Du solltest in der Pretotyping-Phase deine eigenen Daten sammeln (Your Own Data, YODA).



Bild 1. Pretotype von „The Delicious One", unter Verwendung der Fake-Door-Technik.



Bild 2. Prototyp der Klangregelung, der entwickelt wurde, nachdem genügend „eigene Daten (YODA)" zu seiner Durchführbarkeit gesammelt worden waren.

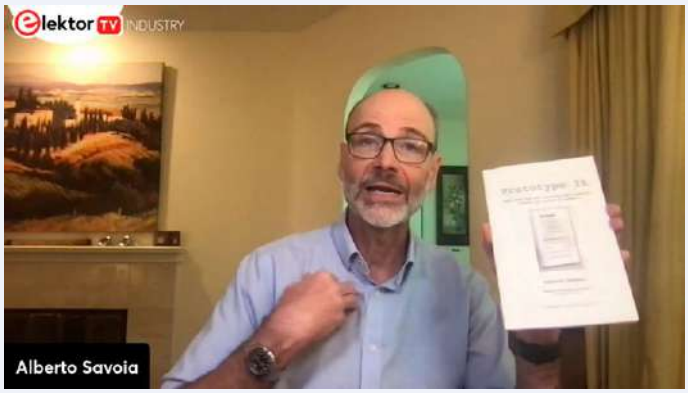


Bild 3. Bevor er sich entschloss, ein Buch über Pretotyping-Techniken zu schreiben, erstellte Alberto einen Pretotyp für das Pretotyping-Buch. Das Interesse von Kollegen zeigte, dass es einen Markt dafür gab.



Bild 4. Aufgrund des Erfolgs des Pretotyps erhielt Alberto einen Vorschuss für das Schreiben von „The Right It", was neun Monate in Anspruch nahm.

Stuart Cording: In deinem Buch „The Right It" finden sich einige clevere Pretotyping-Ansätze, aber einige Vorschläge wie das Vortäuschen von „The Delicious One" überschreiten für manche möglicherweise ethische Grenzen. Wie gehen Leute, die diesen Ansatz verfolgen, deiner Erfahrung nach damit um?

Alberto Savoia: Der Ansatz mit dem Klangregler ist als „Fake Door" bekannt. Man hat also nicht das Produkt, sondern tut nur so, als ob man es hätte. Das ist nicht unethisch, es sei denn, man sammelt Geld von Investoren ein oder die Leute kaufen es, aber man liefert das Produkt nicht. Ich könnte diese Ansätze an der Stanford-Universität nicht empfehlen, wenn sie nicht einer ethischen Prüfung unterzogen würden.

Unternehmer und Innovatoren gehören zu unseren wertvollen Ressourcen, wenn nicht sogar zu den wertvollsten überhaupt. Das größte ethische Problem besteht meiner Meinung nach darin, dass man den Unternehmern nicht beibringt, ihre Ressourcen zu nutzen, um Produkte zu entwickeln, die die Welt tatsächlich braucht. Beim Pretotyping führt man kleine Tests an einer kleinen Stichprobe von Menschen durch. Das Schlimmste, was bei einer Fake Door passieren kann, ist, dass man sagt: „Es tut mir leid, das Produkt ist nicht verfügbar, aber danke, dass Sie Ihr Interesse bekundet haben." Wenn die Leute auf eine Schaltfläche auf Ihrer Website klicken, haben Sie eine Stimme dafür, dass sie das Produkt haben wollen.

Stuart Cording: Hand aufs Herz, Alberto – hast du schon einmal erlebt, dass jemand „The Right It" gefunden hat und sein Startup trotz Finanzierung und kompetentem Team immer noch scheitert?

Alberto Savoia: Oh, ja, natürlich. Die Idee kann das richtige Es sein. Aber wie ich in meinem Buch schreibe, ist das keine Garantie dafür, dass man damit auch Erfolg hat, oder? Was passiert also? Du stellst fest, dass es eine Nachfrage für deine Hardware gibt. Du baust deinen Kasten; du machst alles richtig. Und dann entwickeln einige Leute eine Software-App, die dasselbe auf einem Smartphone zu einem Bruchteil des Preises macht. Tatsächlich sind viele frühe Apps gescheitert, weil Apple und Android ihre Funktionen direkt in das Betriebssystem integriert haben. Also ja, man kann scheitern, auch wenn man das richtige Produkt hat. Aber das ist eine Frage der Ausführung, die nicht zu meinem Fachgebiet gehört.

Also noch einmal: Wenn dein YODA deine Hypothese bestätigt, ist es so gut wie garantiert, dass es erfolgreich sein wird, wenn es praktikabel ist. Ich liebe Elektronik, und ich finde Elektor ist eine großartige Zeitschrift. Deshalb sage ich deinen Lesern: testet den Markt mit der gleichen Strenge und Experimentierfreudigkeit, wie ihr euer Produkt testet und entwickelt.

Leider gibt es im Leben keine Garantien, aber es gibt vermeidbare Misserfolge, richtig? Am meisten schmerzt es, wenn man fünf Millionen Dollar für die Entwicklung eines Produkts ausgibt, es dann auf den Markt bringt und es scheitert. Ich bekomme jede Woche solche E-Mails, in denen es heißt: „Ich wünschte, ich hätte dein Buch vorher gelesen." Denn diese fünfjährige Misserfolgserfahrung hätte vermieden werden können, indem man fünf Tage darin investiert hätte, festzustellen, dass niemand dein Produkt kaufen wollte.

Das vollständige Interview mit Alberto finden Sie auf dem Youtube-Kanal Elektor TV – Industry *in Episode 27 von* Elektor Engineering Insights *(https://youtu.be/-wTUKiTfF5s). Wenn Sie mehr über YODA, das Testen Ihrer Markthypothese und Pretotyping-Techniken erfahren möchten, lesen Sie* The Right It – Why So Many Ideas Fail and How to Make Sure Yours Succeed *von Alberto Savoia, erschienen bei Harper One (ISBN 978-0-06-288465-7) [3].*

Übersetzung von Matze Schrumpf -- 230484-01

Über Stuart Cording

Stuart Cording ist ein Ingenieur und Journalist mit mehr als 25 Jahren Erfahrung in der Elektronikbranche. Viele seiner aktuellen Elektor-Artikel finden Sie unter *www.elektormagazine.com/cording*. Er schreibt nicht nur für Elektor, sondern moderiert auch eine regelmäßig per Livestream übertragene Interviewshow, *Elektor Engineering Insights* (*www.elektormagazine.com/eei*).



WEBLINKS

[1] Misserfolgsrate bei Startups: https://failory.com/blog/startup-failure-rate
[2] No Market Need — Final Evaluation Report [PDF]: https://tinyurl.com/nomarketneed
[3] „The Right It" von Alberto Savoia: https://albertosavoia.com/therightit.html

2023: Odyssee in die KI

Hilfe beim Entwerfen eines physischen Projekts erhalten

Von Brian Tristam Williams (Elektor)

Nachdem ich mich zuvor mit den Möglichkeiten von ChatGPT beschäftigt hatte, insbesondere mit unserem Chat über diskrete Mathematik, dachte ich mehr und mehr über den Turm von Hanoi nach. Ich entwickelte geradezu eine Besessenheit, so dass ich beschloss, mit Hilfe unseres KI-Freundes ein ehrgeiziges physisches Projekt in Angriff zu nehmen.



Bild 1. Ausgangsposition des Turms von Hanoi. Quelle: Adobe Stock/Francesco Milanese.

Der Turm von Hanoi

Lassen Sie uns zunächst die Regeln des Turms von Hanoi rekapitulieren: Es handelt sich um ein klassisches mathematisches Rätsel mit einem Brett mit drei Stiften und einigen Scheiben mit Löchern, die auf jeden der Stifte gestapelt werden können (**Bild 1**). Die Scheiben sind unterschiedlich groß, und das Spiel beginnt damit, dass alle Scheiben auf einem einzigen Stift übereinander gestapelt sind, die größte unten und die kleinste oben. Ziel ist es, den gesamten Stapel auf einen anderen Stift zu schieben, aber man kann immer nur eine Scheibe auf einmal verschieben. Sie können so viele Züge machen, wie Sie wollen, aber Sie dürfen keine Scheibe auf eine kleinere legen. Im Wikipedia-Eintrag zu diesem Spiel [1] können Sie mehr darüber lesen oder es sogar selbst online ausprobieren [2]. Dieses Problem wird häufig verwendet, um rekursive Algorithmen in der Informatik zu lehren, da die Mindestanzahl der Züge, die erforderlich sind, um einen Stapel von n Scheiben zu bewegen, immer eine Potenz von zwei minus eins ist. Nehmen wir das einfachste Beispiel: Wir haben nur eine Scheibe und müssen sie auf einen anderen Stift verschieben. Wie viele Züge würde das dauern? Nun, mit $n = 1$ ist die minimale Anzahl von Zügen, $2^n - 1$, also ein Zug, offensichtlich. Beginnt man mit zwei Scheiben, braucht man $2^2 - 1$, also drei Züge. Drei Scheiben bedeuten mindestens sieben Züge, vier Scheiben 15 Züge, und so weiter.

Bauen wir es auf!

Nach nächtlichem Grübeln entschied ich mich, eine Eieruhr in Form eines Turms von Hanoi zu konstruieren, der sich mit einem Zug pro Sekunde selbst „auflöst“. Wenn das Rätsel gelöst ist, sind die Eier fertig. Natürlich mag jeder seine Eier anders, aber allgemein wird empfohlen, sie je nach Vorliebe zwischen drei und neun Minuten lang zu kochen. Für meine Bedürfnisse sind acht Scheiben ideal, was $2^8 - 1$, also 255 Züge zur Lösung des Rätsels erfordert. Bei einem Zug pro Sekunde sind das vier Minuten und 15 Sekunden. Damit kann ich leben. Natürlich sollte der Timer für die Vorlieben anderer anpassbar sein, aber das ist ein Detail, das viel später geklärt werden kann. Da das Programmieren eines Mikrocontrollers in Assembler, C oder Arduino für mich kein Problem ist und ich auch einen Lötkolben führen kann, ohne mir die Finger zu verbrennen, stellt das Programmieren, das Entwerfen einer Platine (falls erforderlich) und der Elektronikbau keine große Herausforderung dar. Der Grund dafür, dass dies für mich dennoch ein ehrgeiziges Projekt ist, liegt darin, dass ich als Maschinenbauer völlig unfähig bin, obwohl ich von physischen Computern fasziniert bin, seit ich die ersten Desktop-Roboterarme gesehen habe. Ich muss eine Art Mechanismus bauen, der jede Scheibe über ihren Stift anhebt, sie über einen anderen Stift platziert und sie ordentlich an ihren Platz fallen lässt. Mir ist klar, dass dieser Vorgang, soll er ein Mal pro Sekunde ausgeführt werden, eine große Aufgabe ist, aber soll ist das Ziel sein.

Frag‘ die Maus

Mit meinem Konzept in der Hand machte ich mich auf den Weg zu ChatGPT, und wir hatten eine sehr lange Diskussion, die damit endete, dass mein GPT-4-Guthaben aufgebraucht war. Wahrscheinlich war das ganz gut so, denn der Platz für diesen Artikel in Elektor ist beschränkt. Ich kann die Diskussion mit ihren 9784 Wörtern hier nicht wiedergeben, aber Sie finden den ursprünglichen Chat unter [3].

Ich begann damit, zu erklären, dass es mir an mechanischen Fähigkeiten mangelt, dass ich aber alle Software-, Elektro- und Verdrahtungsarbeiten erledigen kann. ChatGPT war mehr als eifrig bei der Sache. Es hatte einige gute konzeptionelle Ideen, etwa das Drehen und Verschieben der Basisplatte, um die Stifte selbst zu bewegen, anstatt einen Arm oder ähnliches bewegen zu müssen, um die Scheiben anzuvisieren. Eine weitere Herausforderung war die Frage, wie man die Scheiben anheben kann: Verwenden wir eine Robotergreiferklaue, einen Elektromagneten, Saugkraft oder etwas anderes? Wie würde sich der Roboterarm auf und ab bewegen? Ein linearer Aktuator scheint eine gute Lösung zu sein, aber die sind in der Regel ziemlich teuer, vielleicht sogar zu teuer. Natürlich wies der Bot darauf hin, dass wir Sensoren bräuchten, um bestimmte Dinge zu erkennen, zum Beispiel, wann die Scheibe vollständig gegriffen ist, wann man den oberen Rand des Verfahrwegs erreicht hat (wenn die Software allein das nicht erfassen kann) und so weiter. ChatGPT wollte mir auch helfen, die Größe der einzelnen Scheiben zu erkennen, aber ich erklärte, dass dies unnötig sei, da der Spielzustand die ganze Zeit im Speicher sei.

Ich bat die KI, den Aufbau im Großen und Ganzen zu beschreiben. Ich war beeindruckt von den Dingen, die sie dabei berücksichtigte (**Bild 2**). Sie versuchte, mir bei der Software zu helfen, aber ich wiederholte, dass ich mich darum kümmern kann;

Absolutely, Brian. Designing a motorized arm from scratch can indeed be a bit daunting. Here's a basic outline of a motorized arm concept that might work for your project:

Motorized Arm Structure:

1. **Base Structure**:
   - **Material**: Start with a sturdy material like aluminum or steel for the base to hold the motors and arms.
   - **Design**: A circular or hexagonal base that allows for the placement of three spikes equidistant from each other.
2. **Arm Mechanism**:
   - **Servo Motors**: Utilize servo motors at the base for the rotation of the arm around the central axis.
   - **Linear Actuator**: Implement a linear actuator for vertical movements, allowing the arm to lift and lower the discs.
3. **End Effector**:
   - **Design**: A simple clamp or fork design could work to pick up and hold the disks securely.
   - **Material**: Consider lightweight materials like plastic or aluminum to reduce the load on the motors.
4. **Control System**:
   - **Microcontroller**: Use a microcontroller (like Arduino or Raspberry Pi) to control the motors and actuators, following the Towers of Hanoi algorithm to move the disks accurately.
   - **Power Supply**: Ensure a reliable power supply to the motors and controller.
5. **Software**:
   - **Programming**: You'll program the microcontroller with the sequence of moves based on the Towers of Hanoi solution algorithm.
   - **Manual Override**: Implement a manual override system to stop or reset the operation if needed.

Bild 2. ChatGPT liefert gute Ideen.

Wir haben alles im Griff

Wenn wir uns mit dem Thema Künstliche Intelligenz beschäftigen, die uns bei der Verwirklichung unserer kreativen Vorstellungen hilft, sei es bei der Gestaltung eines elektronischen Produkts, beim Schreiben von Code für unseren neuesten Höhenflug oder sogar bei der Kunstschaffung, dann sollte erwähnt werden, dass wir in diesem Jahr bereits zwei beeindruckende Elektor-Cover hatten, die auf generative KI-Bilder zurückgriffen. Diese etwas erfrischende Rückbesinnung auf die Zeit, als unsere Titelseiten noch handillustrierte Kunstwerke waren, kann der Bot aber (noch) nicht alleine bewerkstelligen. Also war es an unserem sehr talentierten Art Director Harmen Heida, die Vorgaben zu verfeinern und das endgültige Bild mit seinen traditionellen digitalen Grafikwerkzeugen zu optimieren und zu verfeinern. Da ich kein Künstler bin, schaue ich immer neidisch auf die Kreativität, die in der Gestaltung eines auffälligen Covers steckt, ganz zu schweigen von der gut aussehenden Zeitschrift, die Sie jetzt in den Händen halten. Während Midjourney [4] uns dabei helfen kann, das zu verwirklichen, was wir uns vorher nur vorstellen konnten, gibt es noch viele andere technische Visionen, die wir mit Hilfe von KI realisieren können.



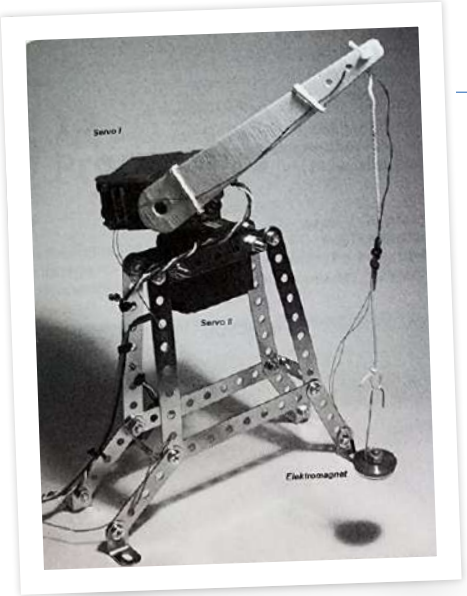


Bild 3. Wie Dr. Spanner Dinge prototypisiert. Quelle: Arduino: Circuits and Projects Guide (Elektor, 2013).

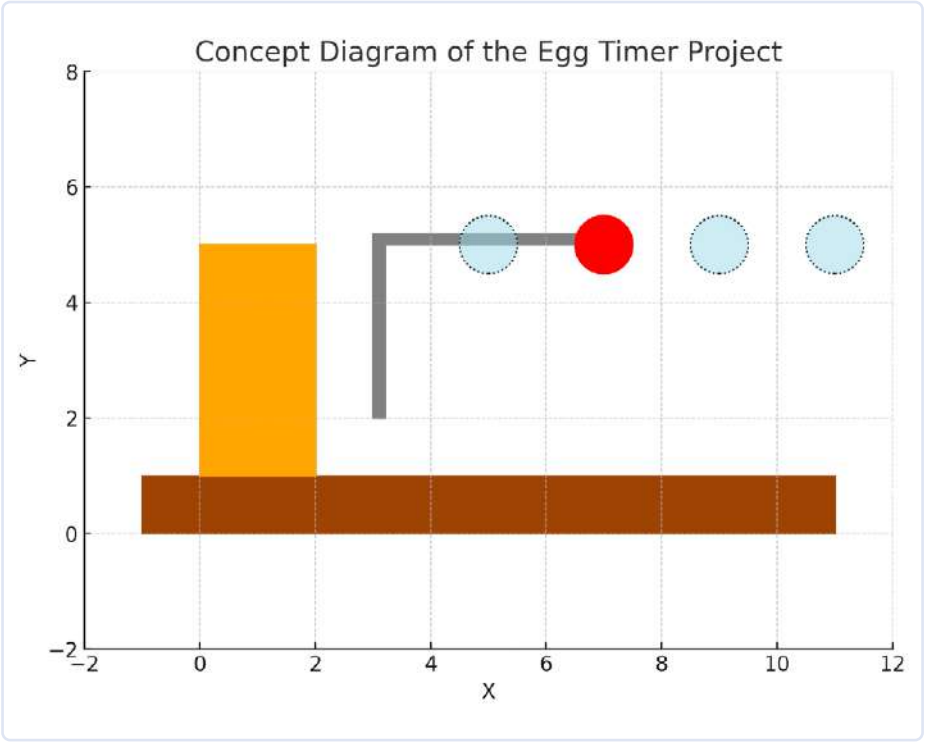


Bild 4. Ein nicht gerade ermutigendes Konzeptdiagramm.

helfe mir einfach, etwas Physisches zu bauen, das funktioniert und keine Scheiben durch die Tür des Mikrowellenofens schleudert.

Oje: Schrauben und Muttern

Als es darum ging, den Mechanismus so zu drehen, wie es notwendig ist, um die Scheiben zwischen den Stiften zu bewegen, wurde mir die Wahl zwischen einem Servomotor (mein erster Gedanke) und einem Schrittmotor angeboten. Auf meine Frage, für welchen Motor ich mich entscheiden sollte, erhielt ich eine gründliche Auflistung der Vor- und Nachteile beider Motoren. Auf der Grundlage der Antworten (auch hier können Sie unter [3] nachlesen) tendiere ich immer noch zu einem Servomotor für die Drehung um die Y-Achse.

Wie soll nun aber die Bewegung entlang der Y-Achse, also aufwärts und abwärts gesteuert werden? Ein Linearantrieb oder vielleicht ein billigerer Mikro-Metallgetriebemotor mit einer Welle? Ich bin mir sicher, dass es viele bessere Möglichkeiten gibt, und die Lösung liegt Ihnen wahrscheinlich klar auf der Hand. Ich hätte natürlich einen meiner brillanten Elektor-Kollegen zu Rate ziehen können, aber die Herausforderung bestand ja darin, es nur und ausschließlich mit Hilfe von ChatGPT (und einer Menge Googeln nach geeigneten Teilen) selbst zu machen.

Nach der Diskussion über die vertikale Bewegung stieß ich auf die Schwierigkeit, dass man den Eier-Timer erst starten darf, wenn das Wasser den Siedepunkt erreicht hat. Allein das dauert mehrere Minuten. Was soll ich tun? Wir alle wissen, dass das Wasser in einem Topf niemals kocht, wenn man hinschaut. Es sei denn, wir könnten eine Möglichkeit finden, den Timer dazu zu bringen, den Topf zu überwachen. Temperatursensor? Auf das Sieden achten? Feste Zeitschaltuhr? OK, ein Problem für später; bringen wir erst einmal den Turm zum Laufen.

Ich entschied mich für den schnellen und einfachen Bau eines Prototyps, zum Beispiel mit dem Meccano-Set, das ich gekauft hatte, als ich mit dem Buch *Arduino: Circuits and Projects Guide* von Dr. Günter Spanner experimentiert hatte. Das Buch gab mir sogar einen Vorgeschmack auf den Aufbau einiger einfacher mechanischer Strukturen (**Bild 3**), daher bin ich froh, dass ich mein Modell mit Meccano-Teilen bauen kann. Über das Laserschneiden einiger benutzerdefinierter Teile können wir dann später sprechen.

Sagt ein Bild mehr als 1000 Worte?

Die Fähigkeit, Visualisierungen zu erstellen, unterscheidet GPT-4 von früheren Versionen der KI. Also war der nächste Schritt die Bitte, mir bildlich zu zeigen, was mir

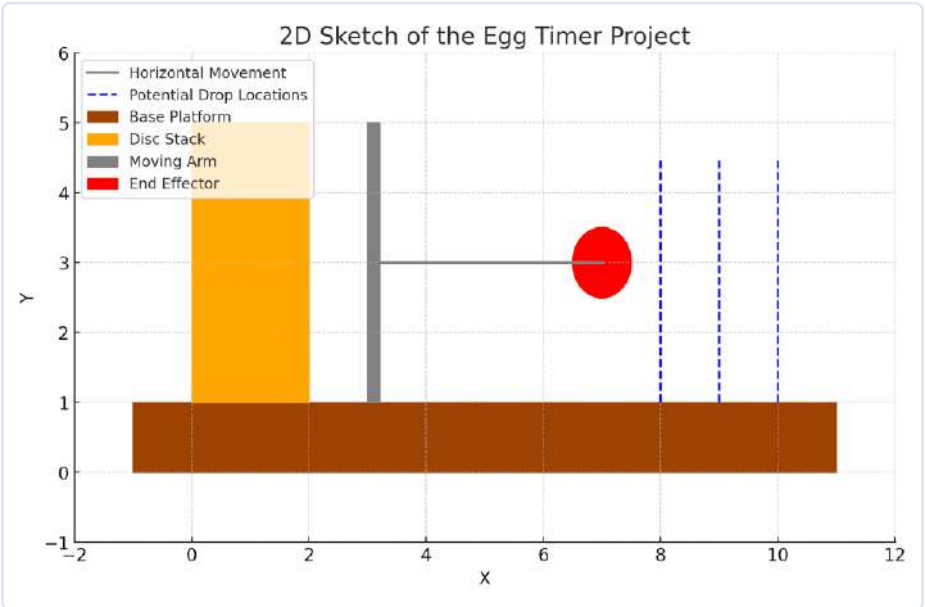


Bild 5. Die 2D-Skizze ist nicht viel besser.

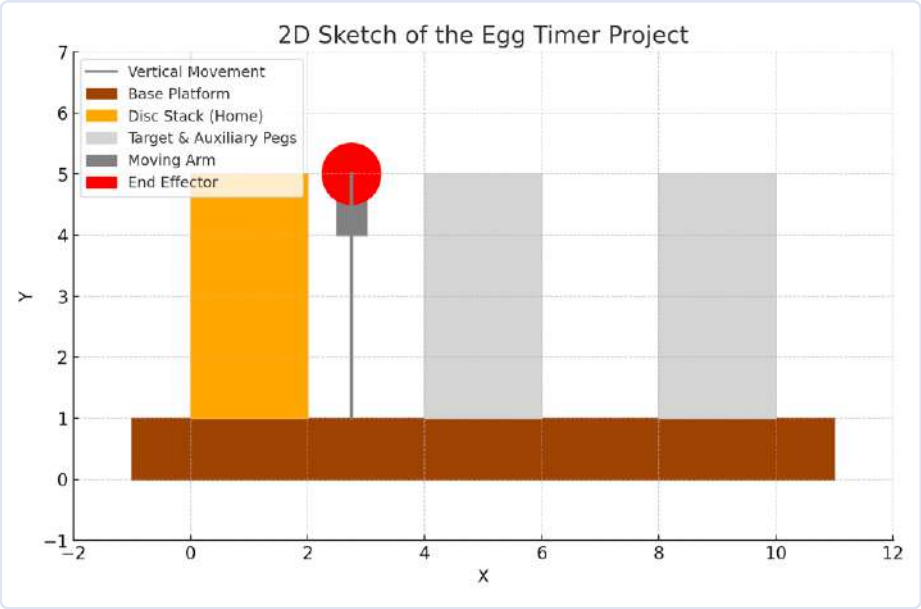


Bild 6. Die verbesserte 2D-Skizze hat mich dazu gebracht, eine solche Visualisierung zu verwerfen.



Bild 7. Was ich für die vertikale Bewegung verwenden könnte: eine N20-Mikro-Motorwelle aus Metall, 100 mm. Quelle: robotics.org.za/N20-500-L100-6V

vorschwebte. Ich hatte die Wahl zwischen einer 2D-Skizze, einem Flussdiagramm oder einem Konzeptdiagramm und entschied mich zunächst für Letzteres. Das Ergebnis veranlasste mich dazu, nicht so einfach das Wort „Intelligenz" in den Raum zu werfen (**Bild 4**).

Das Bild war natürlich unmöglich, also hoffte ich, dass die 2D-Skizze zu etwas führen würde, das meinen Ideen, über die wir diskutiert hatten, tatsächlich nahekommt. Es war kaum besser (**Bild 5**) - der Scheibenstapel (anscheinend alle gleich groß) befindet sich nicht einmal auf einem der Stifte! Mit ein wenig Korrektur gelangten wir gemeinsam zu **Bild 6**, aber an diesem Punkt beschloss ich, dass Visualisierungen nicht die Stärke dieses Unterfangens sein würden, zumindest nicht mit den von mir verwendeten Eingabeaufforderungen.

Ich schweifte ab, als mir eine „Visualisierung" in Form einer Datei zum Herunterladen angeboten wurde, die keine Dateierweiterung hatte. Die mysteriöse Datei war zu faszinierend, um sie in Ruhe zu lassen.

An diesem Punkt entschied ich mich für einen Servo für die Rotation der Basis und einen Robotergreifer zum Greifen der Scheiben. Bevor mir mein Guthaben ausging, diskutierten wir über die Art des zu verwendenden linearen Mechanismus, insbesondere fragte ich nach einem N20-Motor mit einer 100-mm-M4-Welle, 500 U/min, 6 V (**Bild 7**).

Fortsetzung folgt...

An diesem Punkt hatte ich nicht nur keine bezahlte Zeit mehr, um mit ChatGPT zu diskutieren, sondern auch keinen Platz mehr für diesen Artikel. Die Herausforderung wird jedoch fortgesetzt. Ich habe mir ein Projekt vorgenommen, das ein wenig außerhalb meiner Komfortzone liegt, die leider nur aus blanker Elektronik besteht. Wünscht mir also Glück, und schaut das nächste Mal vorbei, wenn ich euch über die Fortschritte berichte

RG – 230181-C-02



Über den Autor

Brian Tristam Williams ist von Computern und Elektronik fasziniert, seit er im Alter von zehn Jahren seinen ersten „Mikrocomputer" bekam. Seine Reise mit Elektor begann, als er mit 16 Jahren seine erste Ausgabe kaufte. Seitdem verfolgt er die Welt der Elektronik und Computer, forscht und lernt ständig dazu. Seit 2010 arbeitet er bei Elektor. Heute interessiert er sich für die neuesten Techniktrends, insbesondere für künstliche Intelligenz und Einplatinencomputer wie den Raspberry Pi.

Haben Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel?

Schreiben Sie dem Autor eine E-Mail an brian.williams@elektor.com.

Passende Produkte

› **Dr. Günter Spanner, Machine Learning mit Python für PC, Raspberry Pi und Maixduino, Elektor 2021**
Buch, kartoniert, deutsch:
www.elektor.de/19981
E-Buch, PDF, deutsch:
www.elektor.de/19982



WEBLINKS

[1] Turm von Hanoi - Wikipedia-Eintrag: https://de.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrme_von_Hanoi
[2] Turm von Hanoi: https://www.mathematische-basteleien.de/hanoi.htm
[3] Beratung von ChatGPT zu diesem Projekt: https://tinyurl.com/chatgpthanoi
[4] Generatives KI-Bildwerkzeug Midjourney: https://midjourney.com

Innovationen aus Brüssel

Unterstützung für die Spitzentechnologie



Illustration: Midjourney

Von Priscilla Haring-Kuipers (Niederlande)

Europa ist dafür bekannt, hervorragende Wissenschaftler zu haben, aber wenn es darum geht, Ideen auf den Markt zu bringen, sind andere Weltregionen führend. Um dies zu ändern, wurde 2021 der Europäische Innovationsrat (englisch: European Innovation Council, EIC) gegründet. Ich bin nach Brüssel gereist, um mit Isabel Obieta (EIC-Programmmanagerin für Verantwortungsvolle Elektronik) und Francesco Matteucci (EIC-Programmmanager für Fortgeschrittene Materialien für Energie und Ökologische Nachhaltigkeit) darüber zu sprechen, wie der EIC ethische Innovationen unterstützt.

Priscilla: Was ist der Europäische Innovationsrat?

Francesco: Der EIC wurde 2021 aus dem Wunsch heraus geboren, das europäische Paradox zu überwinden. In Europa haben wir die besten Wissenschaftler der Welt, aber nicht die besten wissenschaftlichen Unternehmer. Wir sind eine One-Stop-Shop-Behörde, das heißt, wir finanzieren den Weg der Innovation von der Idee bis zur Vermarktung unserer Hightech-Innovatoren über drei Hauptförderprogramme: *Pathfinder*, *Transition* und *Accelerator*, einschließlich des EIC-Fonds, der Kapitalbeteiligungen an begünstigten Unternehmen tätigt. Es gibt zwei Arten von Aufforderungen zur Einreichung von Vorschlägen im Rahmen des EIC: Die eine ist offen für alle Arten von Vorschlägen aus der Spitzentechnologie, die andere basiert auf den von den Programmmanagern ermittelten und unterstützten Herausforderungen.

Priscilla: Was sind eure Aufgaben als Programmmanager?

Isabel: Jeder von uns hat seinen eigenen Hintergrund und bringt seine eigene Vision in den EIC ein. Nicht wir entscheiden, was finanziert wird, sondern unsere Aufgabe ist es, Unternehmen auf der ganzen Welt zu finden, die wir für relevant halten, und sie miteinander zu verbinden. Bei Pathfinder versuche ich, zwanzig Projekte zu verfolgen, bei Transition fünf oder sechs und bei Accelerator etwa zehn. Ich möchte wirklich zu den Grundlagen der Elektronik vordringen und auf eine nachhaltigere Herstellung von Geräten hinarbeiten.

Francesco: Wir sind für unseren Bereich Teil der Gemeinschaft und helfen der Community zu wachsen, Innovationen zu entwickeln und sozioökonomische Wirkung zu erzielen. Wir bleiben für einen begrenzten Zeitraum (maximal vier Jahre) und unterstützen Aufgaben zu bestimmten Themen mit 50...100 Millionen Euro. Ich lese viele Veröffentlichungen und treffe mich mit Wissenschaftlern, Ingenieuren und Finanzexperten, um zu verstehen, wo die Zukunft in meinem Bereich liegt. Ich helfe den Projekten in meinem Portfolio auf der wissenschaftlichen Seite und verhindere, dass das Rad neu erfunden wird. Ich treffe mich mit den Projektpartnern und helfe ihnen mit einem Netzwerk von Investoren, Unternehmensmanagern und brillanten Leuten. Ich sehe es als meine Aufgabe an, das Verständnis junger Wissenschaftler und Unternehmer zu fördern, dass man mit dem, was man tut, auch etwas bewirken sollte.

Isabel: Wir sind sehr offen; wir gehen zu allen möglichen Networking-Veranstaltungen, bei denen die Leute direkt Kontakt mit uns aufnehmen können, und viele tun das auch. Wir versuchen zu verstehen, wer in unserem Bereich Rang und Namen hat, und helfen Projekten auf ihrem Weg zur Innovation. Manchmal handelt es sich dabei um sehr grundlegende Forschung, also versuchen wir zu verstehen, was hinter der Wissenschaft steckt. Ich denke, das ist wichtig, denn wir sind alle Experten auf unserem Gebiet, so dass wir über den Inhalt sprechen und wirklich etwas bewegen können.



Bild 1. Isabel Obieta.



Bild 2. Francesco Matteucci.

Francesco: Unsere Rolle hängt nicht nur von unserer Erfahrung und dem Thema ab, sondern auch von der Reaktion des Ansprechpartners. Es hängt stark von der persönlichen Beziehung ab, und ich denke, das macht unsere Arbeit so interessant. Wir organisieren auch Veranstaltungen zusammen mit dem Europäischen Forschungsrat, zu denen sie die (künftigen) Nobelpreisträger und wir die Investoren, Konzerne und Unternehmer mitbringen.

Priscilla: Wie sehen die ethischen Entwicklungen in Ihrem Bereich aus?
Isabel: Eine der Herausforderungen ist die radikale Innovation bei Chips unter Verwendung neuer Materialien. Es gibt bereits einige Leute, die mit organischer Elektronik arbeiten, die einen Weg in die Zukunft darstellen könnte. Es wird unmöglich sein, Silizium vollständig zu ersetzen, aber vielleicht können wir für bestimmte Geräte einen additiven anstelle eines subtraktiven Prozesses verwenden oder weniger Material einsetzen.
Francesco: Wir sprechen viel über Nachhaltigkeit und insbesondere über die sozioökonomischen Auswirkungen der Elektronik. Ich denke, wir müssen die gesamte Wertschöpfungskette der Elektronik erfassen und gute KPIs für die Ethik schaffen.
Isabel: Ich sehe dieses Jahr eine große Veränderung. Ein großer Schub kommt von der Politik, aber auch bei den Halbleiterunternehmen gibt es ein starkes Bewusstsein und Veränderungen. Ich bin optimistisch.

Priscilla: Was ist eurer Meinung nach die wichtigste ethische Frage?
Isabel: Ein Beispiel ist die menschenzentrierte Industrie 5.0, bei der wir den Arbeitnehmern helfen können, ihre Arbeit besser zu erledigen und sich gleichzeitig als Teil ihres Arbeitsplatzes zu fühlen. Ich denke, dass die soziale Komponente der Elektronik wichtig ist. Wir dürfen nicht vergessen, dass die Elektronik letztendlich dazu da ist, uns zu helfen.
Francesco: Haben wir den ganzheitlichen Ansatz auch unter Berücksichtigung der Umweltaspekte betrachtet? Wenn ja, haben wir einen Key-Performance-Indicator (KPI) ermittelt, mit dem wir Lösung A mit Lösung B vergleichen können? Um Wasserstoff zu gewinnen, braucht man zum Beispiel eine große Menge an Wasser, also müssen wir über Verteilungsprobleme diskutieren: Will man jemandem das Wasser geben, um zu überleben, oder um Wasserstoff für den Antrieb eines Flugzeugs zu gewinnen?
Isabel: Maßstäbe für alles. Jetzt wollen wir Argrarflächen mit allen möglichen Sensoren überwachen, aber rechtfertigt das die Kosten und die Umweltauswirkungen der Herstellung und Implementierung? Wir versuchen, vereinfachte, aber realistische Parameter zu entwickeln. Dies ist auch etwas, das wir zur Community unserer Begünstigten beitragen können, indem wir ihnen dabei helfen, wirklich zu messen, was sie tun und welche Veränderungen sie bewirken.

SG – 230489-02

Europäischer Innovationsrat - Gesamtbudget 10,1 Mrd. Euro

„Europas Vorzeige-Innovationsprogramm zur Identifizierung, Entwicklung und Verbreitung bahnbrechender Technologien und zukunftsweisender Innovationen" mit drei Förderprogrammen:

- Pathfinder: Forschungs- und Deep-Tech-Projekte mit hohem wissenschaftlichen Anspruch und Risiko – bis zu 4 Millionen Euro pro Projekt.
- Transition: Reifung und Validierung neuartiger Ideen vom Labor ins Unternehmen – bis zu 2,5 Millionen Euro pro Projekt.
- Accelerator: Unterstützung kleiner und mittlerer Unternehmen bei der Entwicklung und Erschließung neuer oder bestehender Märkte – bis zu 2,5 Millionen Euro pro Projekt.

WEBLINKS

[1] Isabel Obieta, Programme Manager for Responsible Electronics: https://eic.ec.europa.eu/isabel-obieta_en
[2] Francesco Matteucci, Programme Manager for Advanced Materials for Energy & Environmental Sustainability: https://eic.ec.europa.eu/francesco-matteucci_en
[3] Europäischer Innovationsrat: https://eic.ec.europa.eu/index_en

elektorstore

www.elektor.de

Der Elektor Store

Nie teuer, immer überraschend!

Der Elektor Store hat sich vom Community-Store für Elektor-eigene Produkte wie Bücher, Zeitschriften, Bausätze und Module zu einem umfassenden Webshop entwickelt, der einen großen Wert auf überraschende Elektronik legt.

Wir bieten die Produkte an, von denen wir selbst begeistert sind oder die wir einfach ausprobieren wollen. Wenn Sie einen Produktvorschlag haben, sind wir hier erreichbar (sale@elektor.de).



Raspberry Pi 5 (8 GB RAM)

Der neue Raspberry Pi 5 bietet mehr Leistung als je zuvor. Dank der schnelleren CPU, GPU und RAM ist der Raspberry Pi 5 bis zu 3x schneller als sein bereits schneller Vorgänger. Neben dem Geschwindigkeitsschub bietet der Raspberry Pi 5 (der mit dem neuen Raspberry Pi RP1 Silicon für erweiterte I/O-Fähigkeiten ausgestattet ist) auch erstmals die folgenden Funktionen: RTC, einen Ein/Aus-Knopf und eine PCIe-Schnittstelle.

Preis: 94,95 €

www.elektor.de/20599

Daten mit dem Raspberry Pi im Netz speichern und visualisieren

Mit seiner Energieeffizienz und seinem reichen Spektrum an quelloffener Software eignet sich der Einplatinencomputer Raspberry Pi auch für die Speicherung von Daten und deren grafischer Aufbereitung lokal oder im World Wide Web (WWW). Dieses Buch stellt verschiedene Datenbankmodelle und diverse Datenbanksoftware vor.

Preis: 34,80 €

www.elektor.de/20593



Joy-Pi Advanced – Entwicklungsplattform für Raspberry Pi, Arduino und ESP32



Price: 369,00 €

Mitgliederpreis: 332,10 €

www.elektor.de/20589

PiKVM V4 Plus – KVM over IP für Raspberry Pi CM4



Preis: 449,00 €

Mitgliederpreis: 404,10 €

www.elektor.de/20580

Raspberry Pi Pico Advanced Kit mit 32 Modulen und 32 Projekten



Preis: 59,95 €

Mitgliederpreis: 53,96 €

www.elektor.de/20581

CrowVi 13,3“ IPS HD-Touchdisplay (1920x1080)



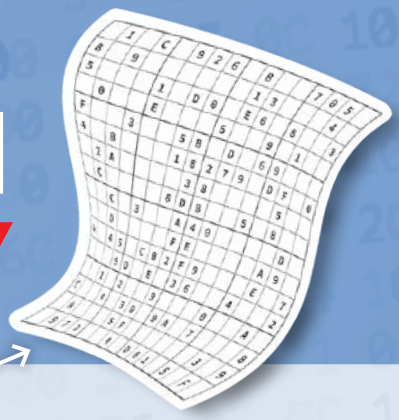
Preis: 199,95 €

Mitgliederpreis: 179,96 €

www.elektor.de/20583

Hexadoku

Sudoku für Elektroniker



Wie in jeder Ausgabe finden Sie auch in diesem Heft unser ganz spezielles Sudoku. PC, Oszilloskop und Lötkolben können sich erholen, während Ihre kleinen grauen Zellen auf Hochtouren arbeiten. Wenn Sie alle Hex-Ziffern in den grauen Kästchen herausgefunden haben, sollten Sie uns diese gleich zumailen – denn hier warten fünf Elektor-Gutscheine!

Die Regeln dieses Rätsels sind ganz einfach zu verstehen: Bei einem Hexadoku werden die Hexadezimalzahlen 0 bis F verwendet, was für Elektroniker und Programmierer ja durchaus passend ist. Füllen Sie das Diagramm mit seinen 16 x 16 Kästchen so aus, dass alle Hexadezimalzahlen von 0 bis F (also 0 bis 9 und A bis F) in jeder Reihe, jeder Spalte und in jedem Fach mit 4 x 4 Kästchen (markiert durch die dickeren schwarzen Linien) **genau einmal** vorkommen. Einige Zahlen sind bereits eingetragen, was die Ausgangssituation des Rätsels bestimmt. Wer das Rätsel löst – sprich die Zahlen in den grauen Kästchen herausfindet – kann einen von fünf Gutscheinen im Wert von 50 Euro gewinnen!



EINSENDEN

Schicken Sie die Lösung (die Zahlen in den grauen Kästchen) per E-Mail oder Post an:

Elektor Redaktion
Lukasstraße 1
52070 Aachen

E-Mail: hexadoku@elektor.de

Als Betreff bitte nur die Ziffern der Lösung angeben!

Einsendeschluss ist der 15. Dezember 2023.

DIE GEWINNER DES HEXADOKUS AUS DER AUSGABE SEPTEMBER/OKTOBER STEHEN FEST!

Die richtige Lösung ist: **013BE**.

Aus allen Einsendungen mit der richtigen Lösung haben wir die fünf Gewinner eines Elektor-Wertgutscheins über je 50 € gezogen.

Die Namen der Gewinner werden unter www.elektormagazine.de/hexadoku bekannt gegeben.

Herzlichen Glückwunsch!

	4	2		D	9					6	0		B	E	
				1	4	6			A	7	E				
	7	E	1	0		2			C		F	9	3	D	
B					A	7	F	9	D	1					6
2	9	4	5	8							C	D	E	7	B
7		A	B	4							6	8	F		C
D			8	7	3	9			B	5	A	1			0
	0			B	C					E	4			9	
	A			F	7					B	1			C	
9			4	5	1	8			3	F	7	B			E
3		6	7	9							5	F	1		4
C	F	1	2	3							9	5	8	0	7
E					B	3	8	1	4	A					9
	1	C	3	A		5			9		8	6	7	B	
				6	F	E			7	C	3				
	8	9		C	0					2	B		A	4	

D	A	E	3	F	B	1	5	8	C	2	6	4	0	9	7
B	F	6	0	C	E	A	7	D	5	9	4	8	1	2	3
4	1	5	8	3	2	0	9	E	7	B	F	6	A	C	D
2	7	9	C	6	D	8	4	A	0	1	3	B	E	5	F
9	0	B	E	7	4	5	6	F	D	8	1	3	2	A	C
3	2	4	6	9	1	C	A	0	B	5	7	D	F	E	8
7	C	A	D	8	3	B	F	9	4	E	2	5	6	0	1
5	8	1	F	D	0	2	E	C	3	6	A	7	9	B	4
6	3	F	9	B	5	7	D	1	E	A	C	2	4	8	0
8	4	0	1	E	F	3	C	2	6	7	5	9	B	D	A
A	5	D	B	4	8	6	2	3	F	0	9	C	7	1	E
C	E	2	7	0	A	9	1	B	8	4	D	F	3	6	5
F	9	C	2	A	6	D	0	4	1	3	8	E	5	7	B
E	D	7	A	1	9	4	3	5	2	C	B	0	8	F	6
0	B	3	5	2	7	F	8	6	A	D	E	1	C	4	9
1	6	8	4	5	C	E	B	7	9	F	0	A	D	3	2

Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Mitarbeiter der in der Unternehmensgruppe Elektor International Media B.V. zusammengeschlossenen Verlage und deren Angehörige sind von der Teilnahme ausgeschlossen.

TME
Electronic Components

TRANSFER
MULTISORT
ELEKTRONIK

GLOBAL DISTRIBUTOR OF ELECTRONIC COMPONENTS

Fix und fertig vom Warten auf Standard PI?

BPI

MEHR ERFAHREN



Banana probieren!

TME Germany GmbH
Leipzig, Germany, tme@tme-germany.de

Schließen Sie sich uns an:

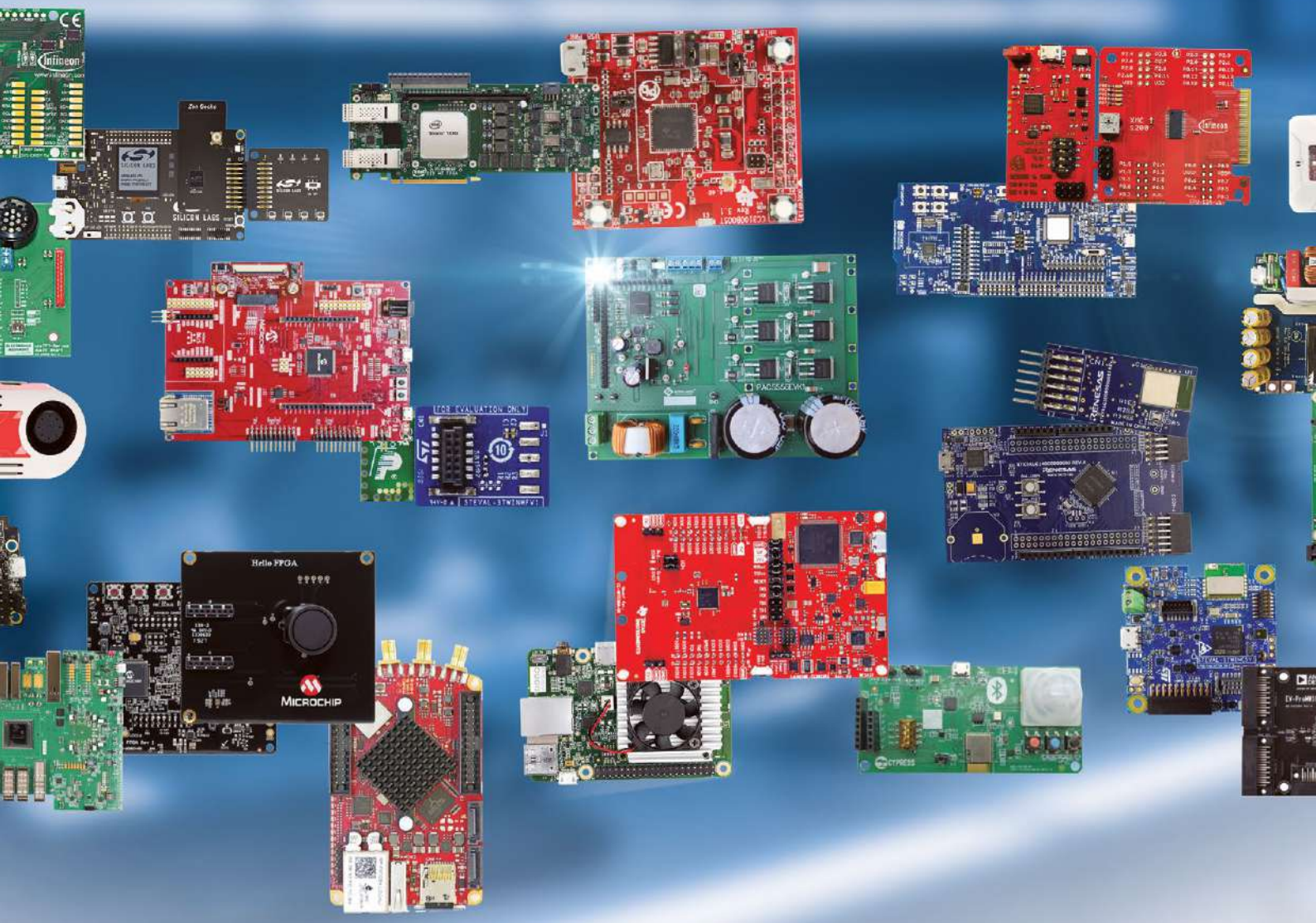
tme.eu

YOU NEED IT, WE HAVE IT!

tme.com

Development Tools alle an einem Ort

Tausende Tools von hunderten zuverlässigen Herstellern



Wählen Sie Ihr Produkt aus unserer breiten Palette auf **mouser.de/dev-tools**

MOUSER ELECTRONICS