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

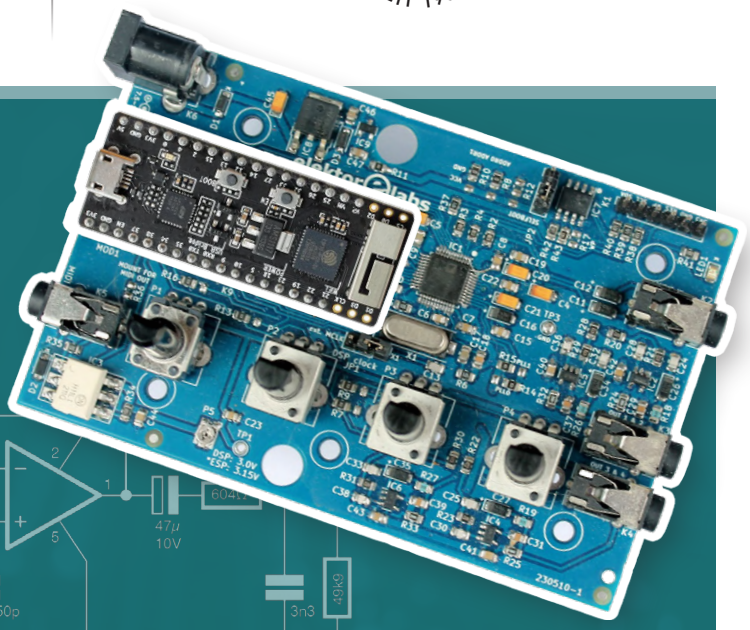
elektorMAG
design > share > earn

605
* SEIT 1961 *

NOVEMBER/DEZEMBER 2024
ELEKTORMAGAZINE.DE

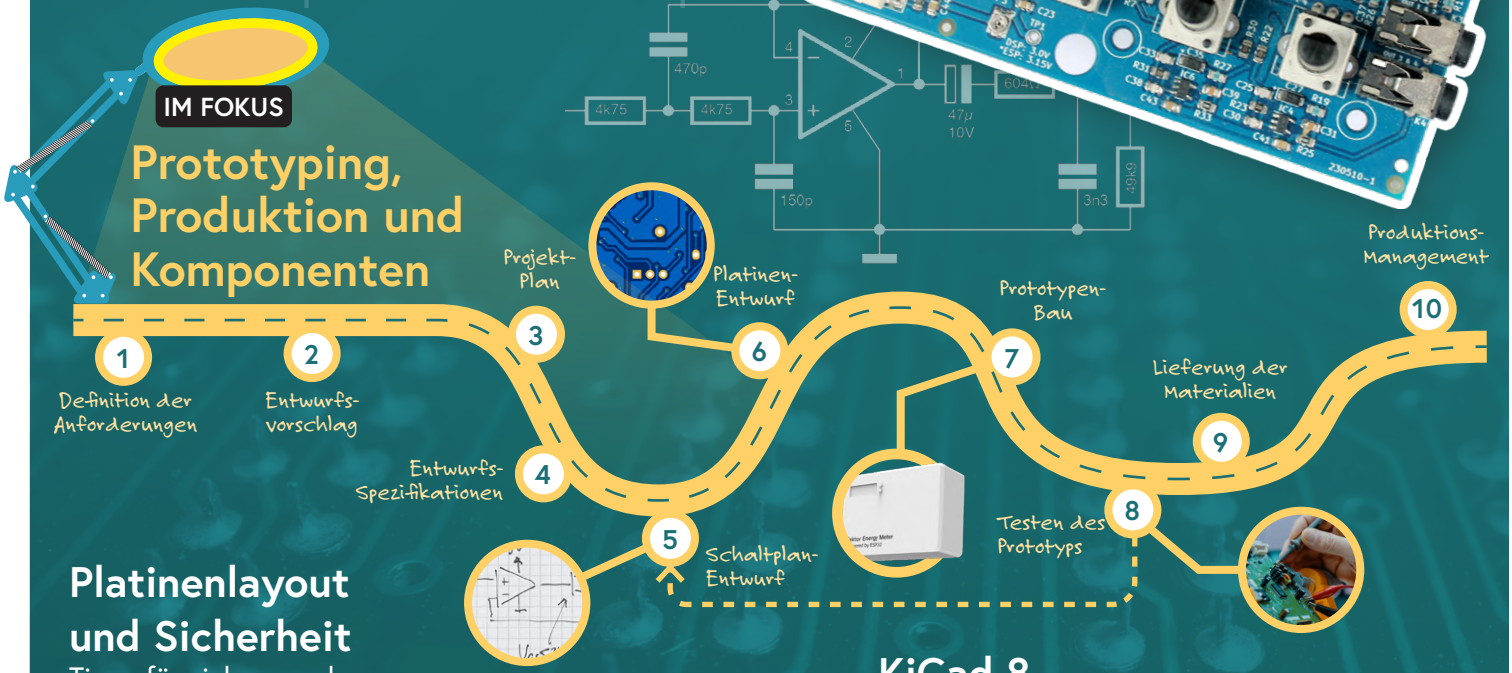
Audio DSP FX-Prozessor-Board

Vielseitige Plattform mit ESP32 und ADAU1701-DSP



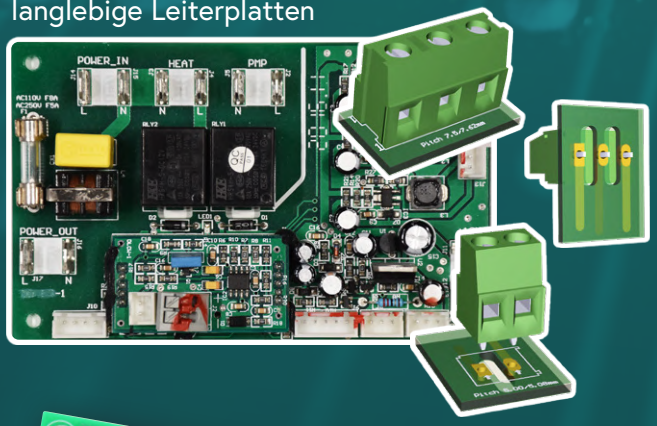
IM FOKUS

Prototyping, Produktion und Komponenten



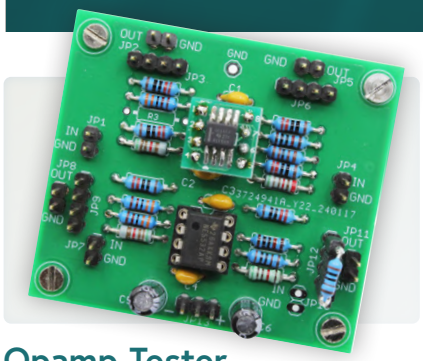
Platinenlayout und Sicherheit

Tipps für sichere und langlebige Leiterplatten



KiCad 8

Neue und aktualisierte Funktionen



Opamp-Tester

Für Audio- und andere Anwendungen

Energiemessgerät mit ESP32

Energieüberwachung mit MQTT

Elektor-MultiCalculator-Kit

Ein Elektronikrechner-Bausatz mit Arduino

4 198630 314904 00112

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 seit vielen Jahren bei reichelt tätig und kennen die Anforderungen unserer Kunden. Sie stellen ein breites Spektrum an Qualitätsprodukten zusammen, optimal auf den Bedarf in Forschung & Entwicklung, Instandhaltung, IT-Infrastruktur und Kleinserienproduktion sowie auf Maker zugeschnitten.

Entwicklerboards für Ihr Projekt

Arduino Science Kit R3

Tauchen Sie ein in die faszinierende Welt der Wissenschaft mit dem Arduino Science Kit R3! Entwickelt für Lehrkräfte und Schüler kombiniert dieses Kit leistungsstarke Hardware und Software.

- inkl. Nano RP2040 Connect, Science Carrier R3, Sensoren
- ermöglicht praktisches, experimentelles Lernen
- Echtzeit-Datenerfassung und -analyse per Science Jounal App
- umfassendes Sensor-Ökosystem zur Erfassung physikalischer Parameter

ARDUINO OFFICIAL RESELLER 2023

Bestell-Nr.:
ARD AKX00045

184,50

ARDUINO

Das reichelt Raspberry PI 5 B All-In-Bundle

Das Raspberry Pi Bundle beinhaltet alles Nötige um sofort starten zu können. Setzen Sie Projekte, wie HD-Mediaplayer, Internetradio, Webcam-Server oder Hausautomatisierung, jetzt einfach um!

Im Bundle enthalten sind:

- Raspberry Pi 5 B mit 2 GB Arbeitsspeicher
- hochwertiges, trendiges Gehäuse
- leistungsstarkes Original-Netzteil (USB C)
- 32 GB microSD-Karte inkl. RaspianOS
- 4-teiliger Raspberry Pi Kühlsatz
- microHDMI-auf-HDMI Kabel, 1 m

Raspberry Pi APPROVED RESELLER

Bestell-Nr.:
RPI 5B 2GB ALLIN

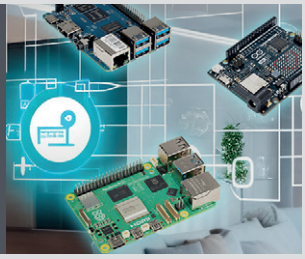
84,50

reichelt elektronik – The best part of your project

reichelt elektronik MAGAZIN

Themen-Special – Entwicklerboards für Ihr Projekt

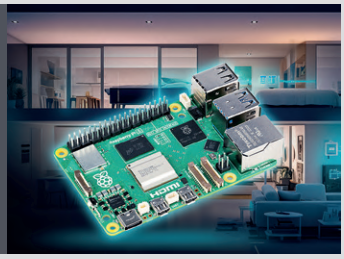
Jetzt lesen ▶
https://rch.lt/MG797



RASPBERRY PI, ARDUINO & CO:

ENTWICKLERBOARDS FÜR IHR PROJEKT

Jetzt entdecken ▶
https://rch.lt/boards-b2c



- Top Preis-Leistungs-Verhältnis
- über 150.000 ausgesuchte Produkte
- zuverlässige Lieferung – aus Deutschland in alle Welt

www.reichelt.de

Bestellhotline: +49 (0)4422 955-333

reichelt elektronik – The best part of your project

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

TAGESPREISE! Preisstand: 22. 10. 2024

IMPRESSUM

55. Jahrgang, Nr. 605
November/Dezember 2024
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

Urheberrecht
© Elektor International Media b.v. 2024

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)

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

DEUTSCHE FACHPRESSE

Elektor ist Mitglied des 1929 gegründeten VDZ (Verband Deutscher Zeitschriftenverleger), der „die gemeinsamen Interessen von 500 deutschen Consumer- und B2B-Verlagen vertritt."

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

EDITORIAL

Jens Nickel

Chefredakteur ElektorMag

Prototyping, Produktion und Komponenten!

Die Elektronik ist ein stark globalisierter Markt. Viele der wichtigen Halbleiterhersteller und -distributoren sind auf verschiedenen Kontinenten tätig. Und wer von uns hat nicht schon einmal Bauteile bestellt, die in kleinen regenfesten Tüten um die Welt geschickt werden? Die Nationalitäten spielen keine große Rolle - manchmal ist es sogar schwierig herauszufinden, wo die Unternehmen ursprünglich gegründet wurden.
Aber es gibt eine Zeit im Jahr, in der die ganze Welt nach Deutschland kommt, und München wird zum Mekka für alle Elektronikprofis und -liebhaber. Wenn die electronica 2024 am Morgen des 12. November eröffnet wird, können Sie die neuesten Entwicklungen in den Bereichen KI, IoT, intelligente Energie, GaN- und SiC-Halbleiter und vieles mehr erwarten. In diesem Jahr feiert die Messe ihr 60-jähriges Bestehen und wird größer sein als je zuvor. Zum ersten Mal werden alle 18 Hallen der Münchner Messe genutzt. Meine Kollegen und ich freuen uns auf diese Messe, denn wir haben ein spannendes Programm an unserem Stand (Halle B4.440). Auf unserer electronica Fast Forward Area stellen fünf Startups ihre Produkte dem Publikum vor. Zusätzlich zeigen drei Influencer ihre neuesten Projekte am Elektor-Stand: GreatScott!, Max Imagination und DIY GUY Chris, die zusammen über zwei Millionen Follower repräsentieren. Außerdem wird es Interviews mit Experten auf der Bühne geben. Am Ende eines jeden Tages werden wir einen Elektor Lab Talk mit verschiedenen Gästen übertragen, die über ihre Eindrücke von der Messe berichten (Dienstag bis Donnerstag, 17:00 Uhr MEZ). Verpassen Sie nicht die Gelegenheit, vorbeizuschauen! Wenn Sie die electronica nicht persönlich besuchen, können Sie sich unsere Interviews und Lab Talk Shows unter www.youtube.com/ElektorIM ansehen.

Wie immer haben wir viele interessante Artikel für unsere November/Dezember-Ausgabe ausgewählt, um Sie auf die Messe einzustimmen, aber auch um Ihnen die Möglichkeit zu geben, die dunklen Wochen des Jahres mit praktischer Elektronik zu füllen. Unser Titelprojekt - das DSP-Board - ist eine komplette Prototyping-Plattform für Audio- und Sound-Enthusiasten. Ich war beeindruckt von der Vielseitigkeit dieses Systems, das mein Kollege Clemens Valens entwickelt hat, der wie ich ein echter Audio- und Musikfan ist. Und natürlich gehen wir in dieser produktionsorientierten Ausgabe auch auf den Bereich der Platinen und Komponenten ein. Sie finden einen ausführlichen Artikel über KiCad 8, ein kleines Opamp-Tester-Projekt und einen Hintergrundartikel über Leiterplatten und Sicherheit.
Noch mehr über Prototyping, Produktion und Bauteile finden Sie in unserer Bonusausgabe, die Sie kostenlos unter www.elektormagazine.de/prototyping-produktion herunterladen können. Tam Hanna stellt eine Reihe von Open-Source-Tools vor, die Sie unbedingt ausprobieren sollten, wir haben einen Leitfaden für den Start Ihrer ESP32-Entwicklung auf PlatformIO und vieles mehr!

Mehr über Prototyping und Produktion

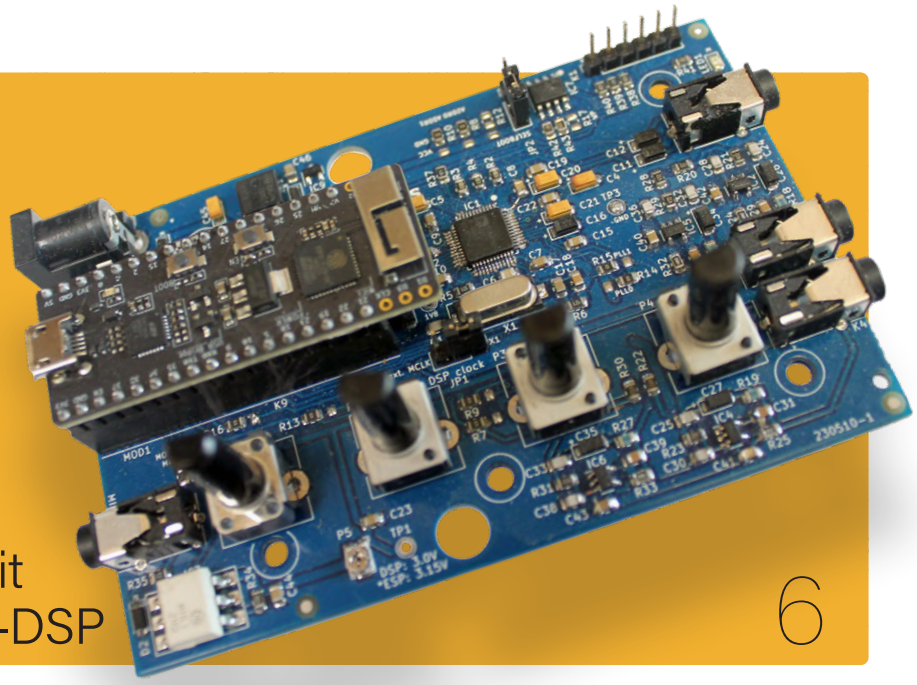
Wenn Sie ein besonderes Interesse an Prototyping, Produktion und Komponenten haben, besuchen Sie unsere Themenseite Prototyping und Produktion, auf der Sie das ganze Jahr über aktuelle Nachrichten und exklusive Artikel zum Thema finden:
www.elektormagazine.de/prototyping-produktion

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, Ouafae Hassani, 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

Audio-DSP-FX-Prozessor-Board

Vielseitige Plattform mit ESP32 und ADAU1701-DSP



6

Rubriken

3 **Impressum**

94 **Aus dem Leben gegriffen**
Mikrotechnophobie

100 **Aller Anfang...**
Weiter geht es mit den Opamps!

106 **2024: Eine Odyssee in die KI**
Ein Blick zurück in die Zukunft

120 **Projekt 2.0**
Korrekturen, Updates und Leserbriefe

Hintergrund

18 **50 Jahre Elektor in englischer Sprache**

22 **KiCad 8**
Neue und aktualisierte Funktionen

28 **Elektor auf der electronica 2024**
electronica Fast Forward Award, Experten und Influencer auf der Bühne, Lab Talk-Shows und mehr

38 **Preiswerte GNSS-RTK-Systeme**
Für zentimetergenaue Positionsbestimmung

50 **Platinenlayout und Sicherheit**
Tipps für sichere und langlebige Leiterplatten

Projekte

6 **Audio-DSP-FX-Prozessor-Board**
Teil 1: Eigenschaften und Design

32 **Elektor-MultiCalculator-Kit**
Ein Elektronikrechner-Bausatz mit Arduino

58 **Opamp-Tester**
Für Audio- und andere Anwendungen

62 **Energiemessgerät mit ESP32**
Energieüberwachung mit MQTT

96 **3D-Weihnachtsbaum**
3D-Platine mit preiswertem 32-Bit-Mikrocontroller

102 **Ein autonomer Sensorknoten**
Reduzierter Leerlauf-Strom mit externer RTC mit Leistungsschalter

112 **LED-Displays mit dem MAX7219**
Ein praktischer Ansatz für einen großartigen Chip

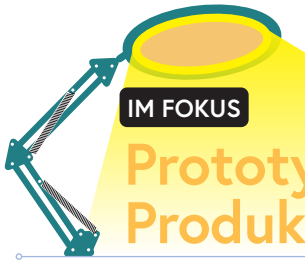
124 **VibroTactile Handschuhe**
Ein Durchbruch für Parkinson-Patienten?

Industry

68 **Echtzeit-Spektrumanalyzer mit Waveguide-Technologie und Multi-Schnittstellen-PCs**

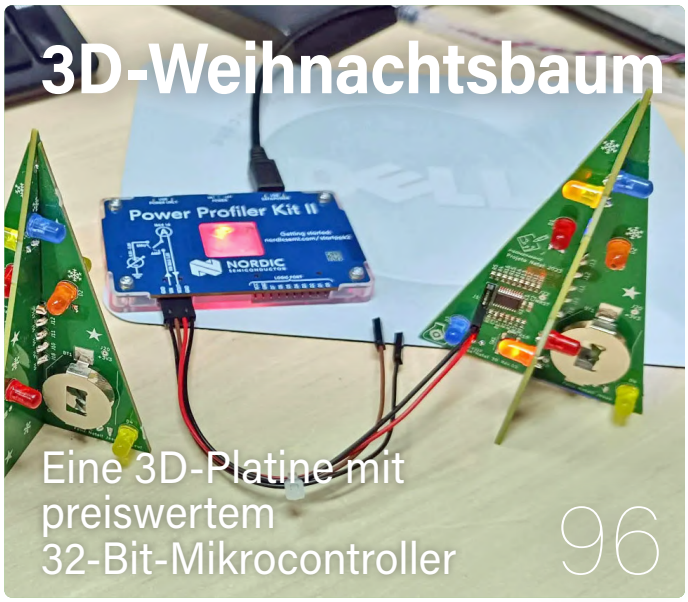
71 **electronica 2024: Highspeed und robuste Board-to Board-Steckverbinder**

72 **SMD-Induktivitäten**
Spulen und Ferrite anwendungsorientiert selektieren



IM FOKUS

Prototyping, Produktion und Komponenten



78 **EMI-Abschirmung zur Einhaltung der elektromagnetischen Konformität**

83 **Das ultimative Werkzeug für jeden Elektronik-Enthusiasten**
Unendliche Möglichkeiten mit Red Pitaya und 1.000+ Click Boards

84 **Die 100 % durchgängige Flussmittelseele**

86 **Siglent stellt seine neue Vektornetzwerkanalysator-Plattform SNA6000A vor**

88 **HDI der Mittelklasse**
Ein neuer ökonomischer PCB-Pooling-Service für hochpolige BGAs

90 **Ferngesteuerte IoT-Entwicklung**
Die einzige Lösung für Fernunterricht und Entwicklung in der Embedded-Industrie

92 **Herausforderungen der DFM-Analyse für Flex- und Rigid-Flex-Design**

BONUS-INHALT

Lesen Sie die kostenlose Elektor-Bonus-Ausgabe Prototyping, Produktion und Komponenten!

- Open-Source-Tools: Antennensimulator, Bauteilverwaltung, Rechner und mehr...
- Erstellen eines ESP32-Projekts mit PlatformIO
- Bemerkenswerte Bauteile: Ungewöhnliche ICs
- HDMI-Digitalmikroskop mit Endoskop

www.elektormagazine.de/prototyping-produktion

Vorschau

Elektor-Gast-Ausgabe KI 2024
Für die nächste Ausgabe haben sich die Elektor-Redakteure mit Experten aus der Welt der künstlichen Intelligenz zusammengetan, um Ihnen eine spezielle Gast-Ausgabe KI zu präsentieren. Wie Sie es von Elektor gewohnt sind, stehen DIY-Projekte im Mittelpunkt dieser Ausgabe, aber Sie finden auch ausführliche Technik-Tutorials, exklusive Interviews und vieles mehr.

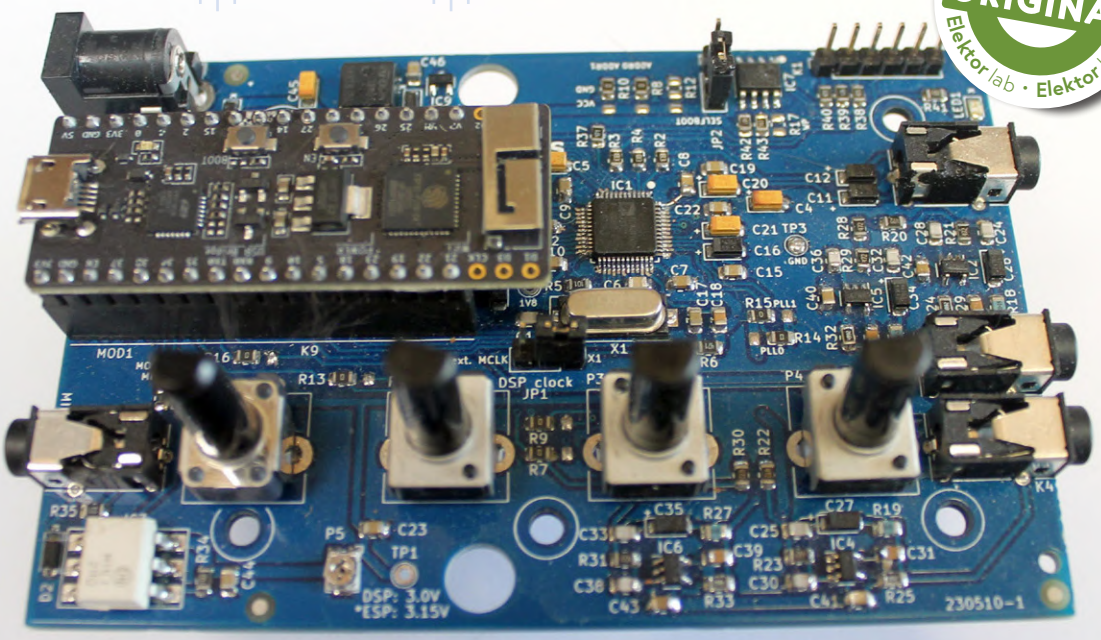
- KI-Sicherheitssystem mit Raspberry Pi 5
- Stechmücken-Erkennung mit Arduino Nicla Vision
- Eine VHDL-Uhr, erstellt mit ChatGPT
- Sprachfunktionen auf dem Raspberry Pi Zero
- Machine Vision mit OpenMV
- Einplatinencomputer für KI-Projekte

Die Elektor-Gast-Ausgabe KI 2024 erscheint am **11. Dezember 2024**.

Elektor Januar/Februar 2025
Das übernächste Heft ist wie immer randvoll gefüllt mit Schaltungsprojekten, Grundlagen sowie Tipps und Tricks für Elektroniker. Schwerpunkt wird das Thema Strom und Energie sein.

- Elektronische Last
- Notebook Power-Bank
- USB-Isolator
- Solarpanel-Simulator
- DIY-Batterie für Solarsysteme
- Magnetometer

Elektor Januar/Februar 2025 erscheint am **15. Januar 2025**
Änderungen vorbehalten!



Audio-DSP-FX-Prozessor-Board

Teil 1: Eigenschaften und Design

Von Clemens Valens (Elektor)

Das Audio-DSP-FX-Prozessor-Board von Elektor ist im Grunde ein ESP32-Mikrocontroller, dem hochwertige Audio-Ein- und Ausgänge hinzugefügt wurden. Was dieses Board jedoch von anderen, scheinbar ähnlichen Boards abhebt, ist die Tatsache, dass das Audio-Interface einen DSP umfasst, der in der Lage ist, Audiosignale auch ganz alleine zu verarbeiten. Dies macht das Board nicht nur leistungsstark, sondern auch flexibel und vielseitig. In diesem ersten Teil des zweiteiligen Artikels wollen wir das Design und die Funktionen des Boards untersuchen.

Der Audio-DSP-FX-Prozessor besteht aus einem ESP32-Mikrocontroller von Espressif und einem Audio-DSP ADAU1701 von Analog Devices. Die Audio-DSP-Familie umfasst leistungsstarke digitale Signalprozessoren (DSPs), die für die Audioverarbeitung optimiert sind. Programme für diese DSPs werden mit dem kostenlosen visuellen Programmiertool SigmaStudio durch Drag&Drop vordefinierter Algorithmusblöcke auf eine Arbeitsoberfläche erstellt.

Der hier verwendete ADAU1701 ist zwar nicht der neueste DSP, aber der zugänglichste. Neben einem frei programmierbaren DSP-Kern besitzt der ADAU1701 hochwertige Analog-Digital- und Digital-Analog-Wandler und verfügt über einen I²S-Port. Dies macht ihn zu einem geeigneten Audio-Interface für den ESP32.

Bevor wir uns mit den verschiedenen Anwendungsfällen des Audio-DSP-FX-Prozessor-Boards beschäftigen, wollen wir uns zunächst das Schaltbild ansehen. Werfen Sie auch einen Blick auf die **Eigenschaften** und die vorgeschlagenen **Anwendungen**. Dies wird Ihnen helfen, die nachfolgende Beschreibung der Schaltung zu verstehen. Wieder zurück? Dann lassen Sie uns sogleich loslegen!

Schaltung en gros

Bild 1 zeigt ein funktionales Blockschaltbild des Audio-DSP-FX-Prozessor-Boards. Es gliedert sich in zwei Hauptblöcke, den ESP32 und den ADAU1701, die über mehrere Busse miteinander verbunden sind. In der Mitte befindet sich der I²S-Bus für den Transport von Audiosignalen zwischen den beiden Prozessoren. Wenn der DSP die gesamte Audioverarbeitung übernimmt (was er kann), wird dieser Bus nicht benutzt und der ESP32 kann für andere Aufgaben verwendet werden. Der I²C-Bus ermöglicht die Steuerung des DSP von einem anderen

Spezifikationen

- ADAU1701: 28-/56-Bit, 50-MIPS digitaler Audioprozessor mit Abtastraten von bis zu 192 kHz
- ESP32: 32-Bit Dual-Core-Mikrocontroller mit Wi-Fi 802.11b/g/n und Bluetooth 4.2 BR/EDR und BLE
- 2× 24-Bit-Audioeingänge (2 V_{eff}, 20 kΩ)
- 4× 24-Bit-Audioausgänge (0,9 V_{eff}, 600 Ω)
- 4× Steuerpotentiometer
- MIDI-Ein- und -Ausgang
- I²C-Erweiterungsport
- Multi-Mode-Betrieb
- Stromversorgung: 5 V_{DC} USB oder 7,5...12 V_{DC} (Klinkenbuchse, Mittelstift ist GND)
- Durchschnittliche Stromaufnahme: 200 mA

Anwendungen

- Bluetooth/Wi-Fi-Audiosenke (z. B. Lautsprecher) und -quelle
- Gitarreneffektpedal (Stompbox)
- Musiksynthesizer
- Sound-/Funktionsgenerator
- Programmierbare Frequenzweiche für Lautsprecher
- Hochentwickelter Audio-Effektprozessor (Hall, Chorus, Pitch-Shifting usw.)
- Internet-gesteuertes Audiogerät
- DSP-Experimentierplattform
- Drahtloser MIDI-zu-CV-Konverter
- und vieles mehr!

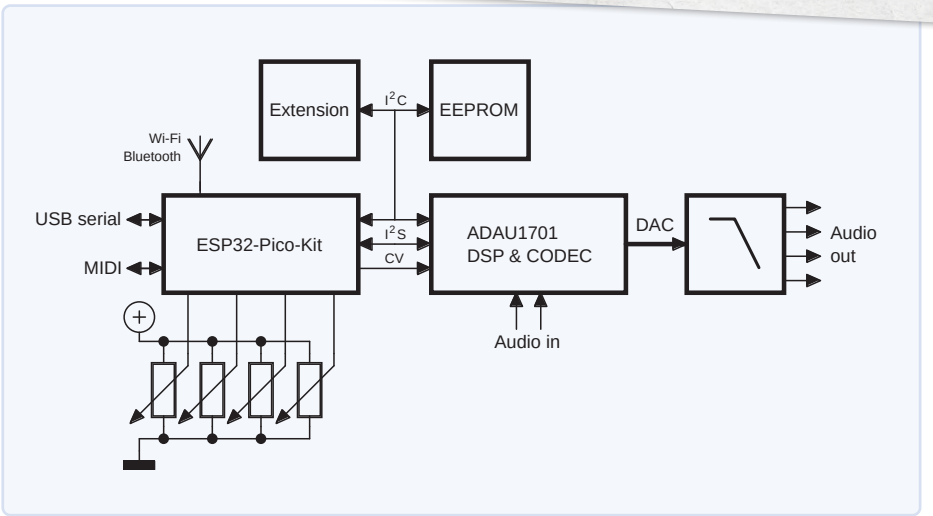


Bild 1. Die Blockschaltung der Audio-DSP-FX-Prozessor-Platine umfasst mit einen ESP32-Prozessor und einen DSP zwei Hauptblöcke.

Prozessor wie dem ESP32 oder einem Arduino UNO aus, der an den Erweiterungsport angeschlossen ist. Der DSP könnte dafür auch SPI verwenden, aber wir haben uns letztendlich für I²C entschieden, weil der Bus einfacher zu erweitern ist als ein SPI-Bus (keine Slave-Select-Signale erforderlich).

Dieser Bus steht auch zum Lesen und Schreiben des EEPROMs zur Verfügung. Wenn sich der ADAU1701 zum Beispiel im so genannten *Selfboot*-Modus befindet, erwartet er, dass sein Programm in diesem EEPROM gespeichert wird. Der ESP32 kann das EEPROM mit einem DSP-Programm aufladen, das er von einem anderen Computer, drahtlos oder über USB erhalten hat.

Der vierte Bus mit vier Kanälen führt vom ESP32 zum DSP und ist für analoge Signale bestimmt, die sich im DSP zur Steuerung von Parametern der DSP-Algorithmusblöcke verwenden lassen. Wir können diese analogen Spannungen entweder mit Potentiometern (auch für andere Zwecke verwendbar) oder mit einer auf dem ESP32 laufenden Firmware steuern.

Der Audio-I/O-Bus besteht aus zwei Eingangskanälen und vier Ausgangskanälen. Die Ausgänge werden entweder durch passive oder aktive Filter gefiltert (siehe unten), die Eingänge im DSP.

Neben den bisher genannten Signalen verfügt der ESP32 auch über einen USB-zu-Seriell-Wandler und einen MIDI-Eingang (optisch isoliert) sowie einen MIDI-Ausgang, und nicht zuletzt besitzt der ESP32 über ein Funkmodul für die Wi-Fi- und Bluetooth-Kommunikation, was hier vom Antennensymbol angezeigt wird.

Schaltung en détail

Der detaillierte Schaltplan des Audio-DSP-FX-Prozessor-Boards ist in **Bild 2** dargestellt. IC1 ist der Audio-DSP ADAU1701. Die ihn umgebende Schaltung ist fast eine 1:1-Kopie des DSP-Datenblatts. Der einzige Zusatz, den wir vorgenommen haben, ist der Jumper JP1, mit dem Sie die Taktquelle für den DSP auswählen.

Die Audio-Ausgangsfilter (IC2, IC4, IC5 und IC6, siehe **Bild 3**) sind als vier vollständig getrennte Kanäle gestaltet, ohne dass ein Operationsverstärker-IC von zwei Kanälen genutzt wird. Dies vereinfacht nicht nur das Routing der Platine, sondern ermöglicht auch die Bestückung mit nur den Bauteilen, die für eine bestimmte gewünschte Audioausgangskonfiguration erforderlich sind (das heißt, zwei Kanäle mit passiven Filtern oder vier Kanäle mit aktiven Filtern). Allerdings ist der Preisunterschied marginal.

Die vier analogen Signale, die die Parameter im DSP steuern, werden an MP9, MP2, MP3 und MP8 angeschlossen (ADC0 bis ADC3, in dieser Reihenfolge). Abhängig von der Position eines Lötjumpers (R16, R13, R7 und R9), kann das Signal entweder von einem Potentiometer oder vom analogen Multiplexer (IC10 und IC11) stammen. Letzterer ist erforderlich, da der ESP32 nur zwei analoge Ausgänge besitzt. Falls ein Potentiometerschleifer zum DSP geführt wird, muss der entsprechende Multiplexer-Vorwiderstand (R44, R46, R47, R45) entfernt werden. Stellen Sie in diesem Fall auch P5 so ein, dass die Spannung an der „heißen" Seite der Potentiometer 3 V beträgt. Wenn alle Potentiometer mit dem ESP32 verbunden sind, stellen Sie P5 am besten auf 3,15 V, da dies ihren Dynamikbereich des ESP32 leicht verbessert.

Der I²S-Bus kann ein wenig Kopfzerbrechen bereiten. Der ADAU1701 unterstützt sowohl den I²S-Master- als auch den Slave-Modus, ebenso wie der ESP32. Also, wer wird Master und wer wird Slave sein? Als das Projekt entwickelt wurde, unterstützten die ESP32-Softwarebibliotheken den I²S-Slave-Modus (noch) nicht. Daher musste der ESP32 der Master sein. Problem gelöst? Fast.

Ein subtiles (undokumentiertes?) Detail des ADAU1701 besteht darin, dass die I²S-Taktsignale mit seinem Master-Takt synchron sein müssen. Wenn das nicht der Fall ist, werden die Audioausgänge stummgeschaltet, was wir definitiv nicht wollen. Die einzige Möglichkeit, die Synchronität zu gewährleisten, wenn der DSP I²S-Slave ist, besteht darin, den

DSP vom ESP32 aus zu takten. An dieser Stelle kommt JP1 ins Spiel. Er ermöglicht die Auswahl der DSP-Taktquelle: Quarz X1 oder das MCLK-Signal des ESP32. Wenn I²S verwendet werden soll, müssen Pin 2 und Pin 3 von JP1 kurzgeschlossen sein. Wenn der I²S-Bus nicht benötigt wird, schließen Sie Pin 1 und Pin 2 von JP1 kurz.

Der ESP32 wird als ESP32-PICO-KIT verwendet, einem einfach zu bedienenden Modul mit einem USB-zu-Seriell-Wandler und einer 3,3-V-Stromversorgung auf der Platine. Ein Modul statt eines bloßen ESP32 direkt auf die Hauptplatine zu montieren, erspart eine Menge Antennenanpassung und andere HF-bezogene Probleme. Außerdem kann man das Modul nur dann montieren, wenn man es benötigt. C58 wird nur in dem seltenen Fall eingesetzt, in dem das ESP32-Modul nicht bootet, wenn es nicht mit USB verbunden ist. Wenn dies der Fall ist, haben Sie wahrscheinlich ein sehr altes Modul vor sich.

Der DSP wird von IC9 mit Strom versorgt, der wiederum entweder über den USB-Anschluss oder von IC8 mit Strom versorgt wird. Der aufmerksame Leser wird sich vielleicht fragen, warum es keine zweite Schutzdiode wie D3 in der 5-V-Versorgung vom ESP32-Modul gibt. Der Grund dafür ist, dass diese Diode bereits auf dem ESP32-Modul vorhanden ist. Die Stromversorgungsschiene VCC ist über T1 mit dem internen 1,8-V-Spannungsregler des DSP verbunden, ganz so, wie es das Datenblatt des DSP vorschlägt.

Programme für den DSP können in IC7, dem EEPROM (in SigmaStudio *E2Prom* genannt), gespeichert werden. Das EEPROM bietet viel mehr Speicherplatz als für ein DSP-Programm nötigt, so dass es der ESP32 auch für andere Daten nutzen kann. Es ist zudem auch vom Anschluss K1 über den I²C-Bus zugänglich und kann von einem externen Controller wie einem Arduino UNO oder einem Raspberry Pi Pico gelesen und beschrieben werden kann.

Ein Wort zur MIDI-Schnittstelle. Es handelt sich um einen einfachen optisch isolierten Eingang und einen nicht isolierten Ausgang, der jedoch aus Platzgründen mit einer 4-poligen 3,5-mm-Klinkenbuchse (Tip-Ring-Ring-Sleeve, TRRS) realisiert ist. Die meisten an MIDI Interessierten dürften aber nur den Eingang benötigen und ein TRS-Kabel verwenden. Ein solches Kabel würde den MIDI-Ausgang (Pin R2 von K5) gegen Masse kurzschließen, weshalb R36 standardmäßig nicht bestückt ist. Wenn Sie aber R36 (82 Ω) bestücken, um den Ausgang zu aktivieren, müssen Sie auch ein geeignetes Kabel verwenden.

LED1 ist vom Anwender programmierbar und kann sich beim Debuggen von Software oder als Modusanzeige oder für andere Zwecke nützlich machen.

Die Stromaufnahme hängt natürlich stark von der Anwendung ab, liegt aber bei einer Versorgungsspannung von 9 V_{DC} im Durchschnitt bei etwa 200 mA

Ein Board - viele Funktionen

Nachdem Sie nun eine ungefähre Vorstellung davon haben, worum es sich beim Audio-DSP-FX-Prozessor-Board handelt, wollen wir die Spezifikation für den Multimodus-Betrieb etwas genauer betrachten. Wie diese Bezeichnung schon andeutet, kann das Board in verschiedenen Konfigurationen verwendet werden:

- Nur DSP
- DSP mit integriertem EEPROM-Programmierer
- DSP mit OTA
- DSP als I²S-DAC
- Musiksynthesizer / Klangerzeuger
- Erweiterter Audio-Effektprozessor (FX)
- Sonstiges

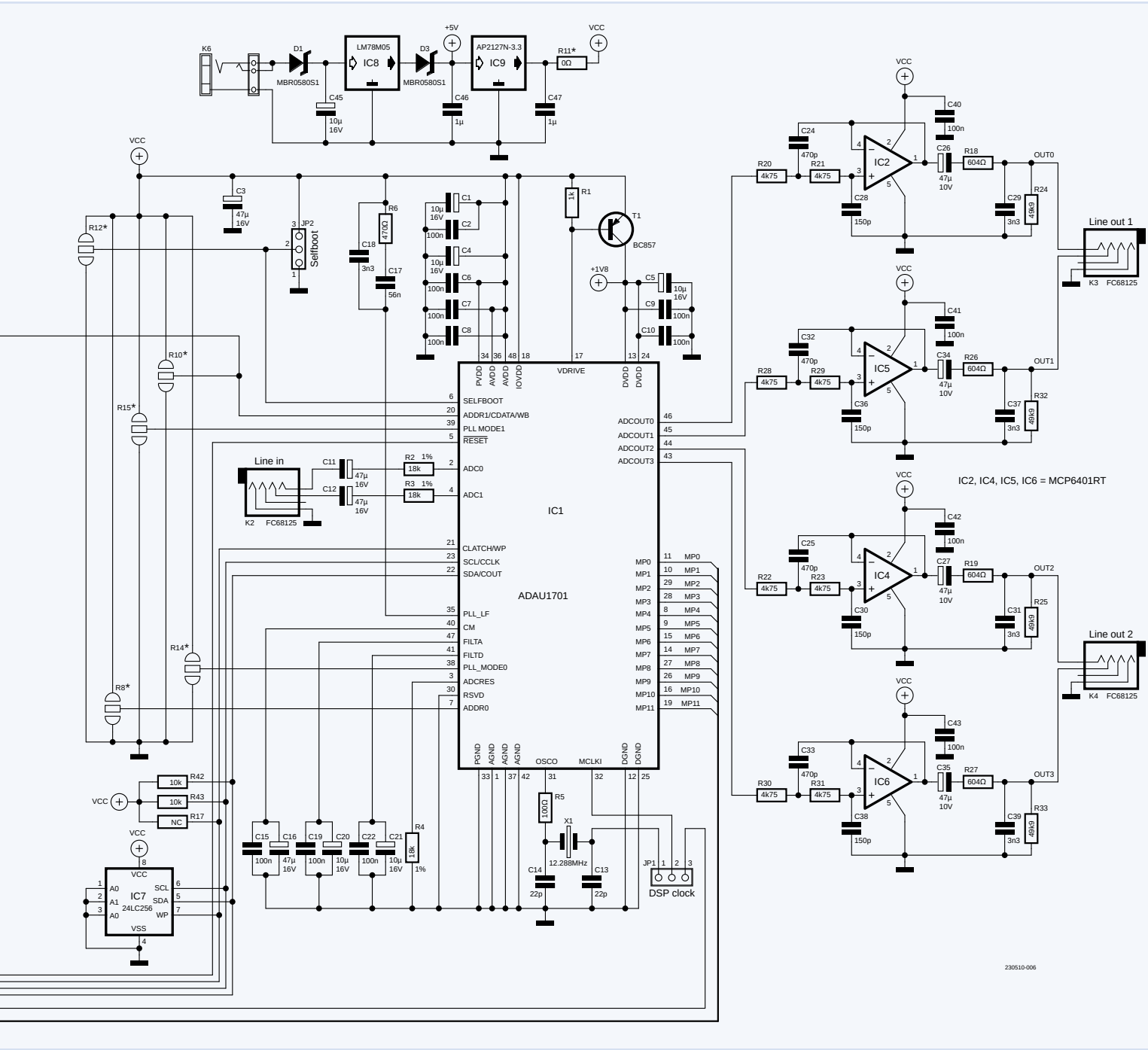


Bild 2. Das Schaltbild des Audio-DSP-FX-Prozessors. Er passt zwar nicht auf eine Heftseite, aber auf eine Platine von circa 102 mm × 66 mm.

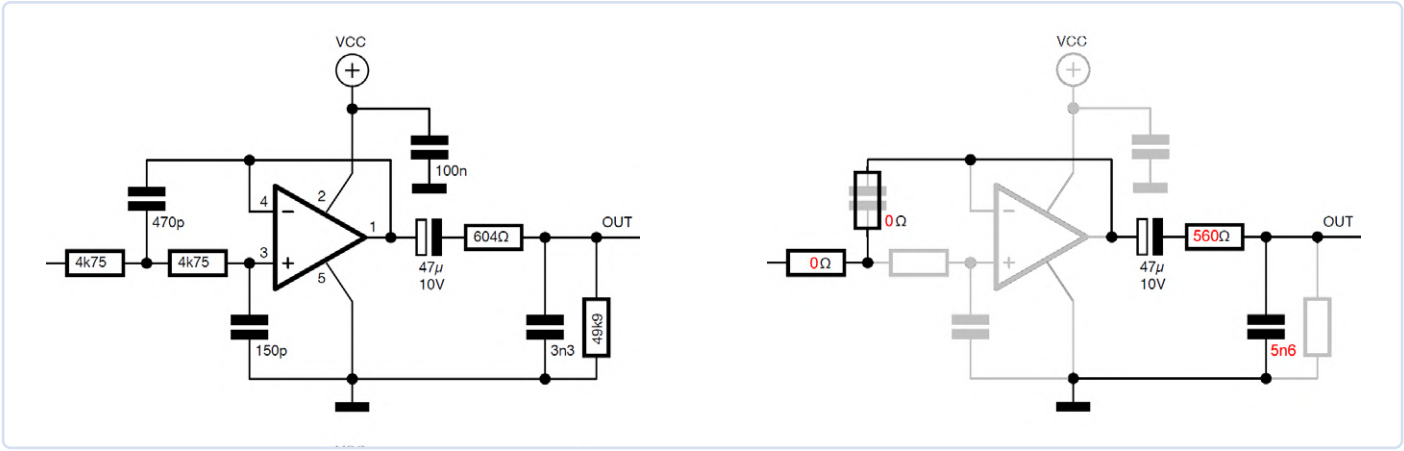


Bild 3. Der Audio-DSP-FX-Prozessor unterstützt sowohl aktive als auch passive Ausgangsfilter.

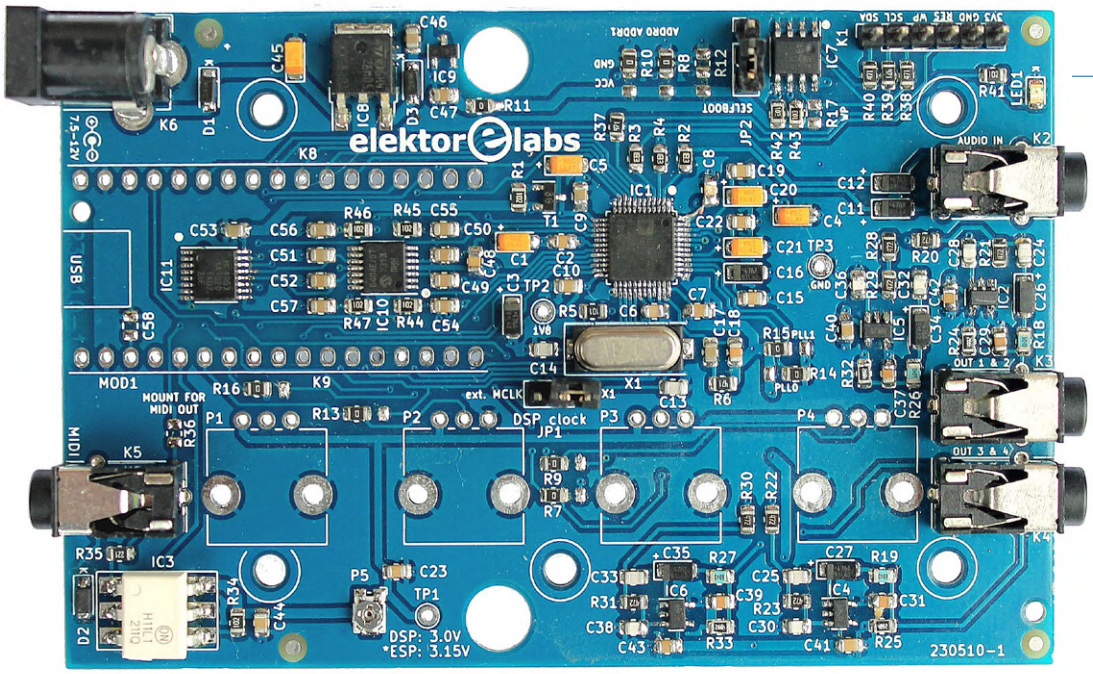


Bild 4. Die für den Stand-alone-Betrieb des DSPs bestückte Platine ohne Potentiometer.

Nur DSP

In dieser Konfiguration (**Bild 4**) ist das Board identisch mit dem im Januar 2014 veröffentlichten „Universellen Audio-DSP-Board" (Elektor-Projekt 130232). Die Programme für den DSP werden in SigmaStudio 4.7 erstellt, als HEX-Datei exportiert und über den Anschluss K1 zum Beispiel mit einem Arduino UNO [1] in das EEPROM geladen. Stecken Sie den Jumper JP1 in die Position *X1* (an Pin 1 und Pin 2, der DSP-Takt wird vom Quarz X1 geliefert) und JP2 in die Position *Selfboot* (an Pin 2 und Pin 3, damit der DSP sein Programm aus dem EEPROM lädt). Die Jumper-Widerstände R7, R9, R13 und R16 sollten auf der rechten Seite positioniert werden, das heißt, von den auf der Platine aufgedruckten Namen wegführend, damit die Steuerung über Potentiometer möglich ist. In dieser Konfiguration können Audioeffekte wie Hall oder Filterung zum Eingangssignal hinzugefügt werden. Beliebte Anwendungen sind wegen der vier unabhängigen Audioausgänge eine Frequenzweiche für Lautsprecher oder Gitarreneffekte.

DSP mit integriertem EEPROM-Programmierer

Wie *Nur DSP*, aber mit dem ESP32-Pico-Kit auf dem Board, das die EEPROM-Programmierung vereinfacht. DSP-Programme können nun über USB auf den ESP32 hochgeladen werden, der sie dann in das EEPROM brennt. Neben der vereinfachten EEPROM-Programmierung gestattet diese Konfiguration auch die Speicherung von mehr als einem DSP-Programm. Ein Webserver, der auf dem ESP32 läuft, kann zum Beispiel eine Benutzeroberfläche zur Auswahl verschiedener DSP-Algorithmen bereitstellen.

DSP mit OTA

Wie *DSP mit integriertem EEPROM-Programmierer*, aber in dieser Einstellung bietet der ESP32 eine WLAN-Verbindung zu SigmaStudio, um DSP-Algorithmen Over the Air (OTA) hochzuladen, ohne HEX-Dateien zu exportieren. Dies ist der einfachste Weg, den DSP in SigmaStudio zu programmieren, aber die Programme werden nicht im EEPROM gespeichert. Diese Konfiguration ist sinnvoll bei der Entwicklung und dem Testen neuer SigmaStudio-Algorithmen im laufenden Betrieb. Stecken Sie JP2 auf Pin 1 und Pin 2, um den DSP anzuweisen, sein Programm nicht aus dem EEPROM zu laden.

DSP als I²S-DAC

In dieser Konfiguration ist das ESP32-Pico-Kit die Audioquelle, während der DSP als hochwertiger Digital-Analog-Wandler (DAC) fungiert. Die Audiodaten werden über I²S gesendet. Setzen Sie den Jumper JP1 in die Position *ext. MCLK* (auf Pin 2 und Pin 3, so dass der DSP-Takt vom ESP32 bereitgestellt wird). Der Einfachheit halber stecken Sie JP2 in die Position *Selfboot* (Pin 2 und Pin 3, damit der DSP sein Programm aus dem EEPROM lädt) und programmieren den DSP mit einem einfachen I²S-Pass-Through-Programm (in den Downloads enthalten). Diese Konfiguration eignet sich für drahtlose Streaming-Audioplayer (Wi-Fi oder Bluetooth). Klangeffekte wie Hall oder Pitch-Shifting können einfach hinzugefügt werden, indem man entsprechende Algorithmen in SigmaStudio erstellt und sie in das EEPROM des DSP lädt. Die vier Potentiometer stehen zur Steuerung der Parameter zur Verfügung (achten Sie auf die richtige Positionierung der Jumper-Widerstände!). Der analoge Audioeingang kann natürlich auch verwendet werden, um Karaoke- und andere Audio-Mischanwendungen zu ermöglichen.

Musiksynthesizer / Sound-Generator

Diese Konfiguration ist im Grunde die gleiche wie die vorherige, nur dass der ESP32 jetzt den größten Teil (wenn nicht alles) der Signalverarbeitung übernimmt. Der DSP fungiert als schicker I²S-Audio-DAC. Der ESP32 ist die (Sound-)Maschine, der den Sound von Grund auf mit benutzerdefinierten Algorithmen erzeugt. Mehrere Klangsynthese-Bibliotheken sind online verfügbar, so dass dies ein interessantes Gebiet ist. Der MIDI-Eingang ermöglicht es, den Synthesizer mit einem MIDI-Keyboard zu spielen und ihn zum Beispiel mit MIDI-CC-Messages (Control Change a.k.a. Continuous Controller) zu steuern. Natürlich ist auch eine serielle oder eine drahtlose Steuerung möglich. Mit den vier Potentiometern lassen sich noch mehr Einstellungen vornehmen und darüber hinaus kann auch der DSP seine eigenen Soundeffekte hinzufügen.

Erweiterter Audio-Effektprozessor (FX)

Wie zuvor, aber anstatt den ESP32 als Soundquelle zu nutzen, wird er nun als digitaler Signalprozessor verwendet. Der ADAU1701 stellt dabei die Audio-Ein- und Ausgänge zur Verfügung. Er sendet digitales Audio

Stückliste

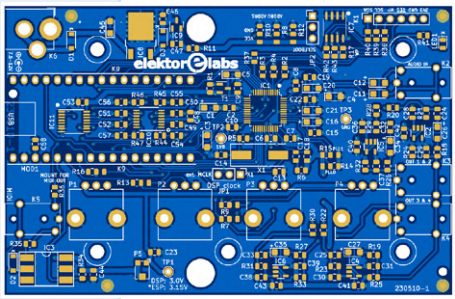
Widerstände:
(alle 0805, 0,125W,5%, wenn nicht anders angegeben)
R7...R11,R13...R16 = 0 Ω
R1,R34,R41,R44...R47 = 1 k, 1%
R2...R4 = 18 k 1 %.
R5 = 100 Ω
R6,R37...R40 = 470 Ω
R18,R19,R26,R27 = 604 Ω, 1%
R20...R23,R28...R31 = 4k75, 1 %
R24,R25,R32,R33 = 49k9, 1 %.
R35 = 220 Ω
R42, R43 = 10 k
P1...P4 = 10 k, linear/B, vertikal
P5 = 1 k Trimmpoti
R12, R17, R36 = n.c.

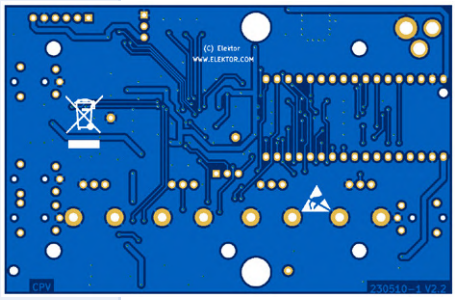
Kondensatoren:
(alle 0805)
C1,C4,C5,C20,C21,C45 = 10 µ, 16V
C2,C6...C10,C15,C19,C22,C23 = 100 n
C40...C44,C48,C53 = 100 n
C3,C11,C12,C16,C26,C27,C34,C35 = 47 µ, 10V
C13,C14 = 22 p
C17 = 56 n
C18,C29,C31, C37,C39 = 3n3
C24,C25,C32,C33 = 470 p
C28,C30,C36,C38 = 150 p
C46,C47,C49...C52,C54...C57 = 1 µ
C58 = n.c. (100 n, wenn erforderlich)

Halbleiter:
D1, D2, D3 = MBR0580S1
IC1 = ADAU1701JSTZ
IC2, IC4, IC5, IC6 = MCP6401RT-E/OT
IC3 = H11L1S-M
IC7 = 24LC256
IC8 = LM78M05
IC9 = AP2127N-3.3
IC10 = MCP6404T-E/ST
IC11 = 74HC4053PW
LED1 = LED, rot, 0805
T1 = BC857
MOD1 = ESP32-PICO-KIT (Espressif)

Außerdem:
JP1,JP2 = 1×3-polige Stiftleiste,
RM 2,54 + Jumper
K1 = 1×6-polige Stiftleiste, RM 2,54
K2...K5 = Audio-Buchse, 4-polig (TRRS)
K6 = Niederspannungsbuchse
K8,K9 = 2×17-polige Stiftleiste, RM 2,54
X1 = Quarz 12,288 MHz, 20 pF

Elektor-Platine 230510-1





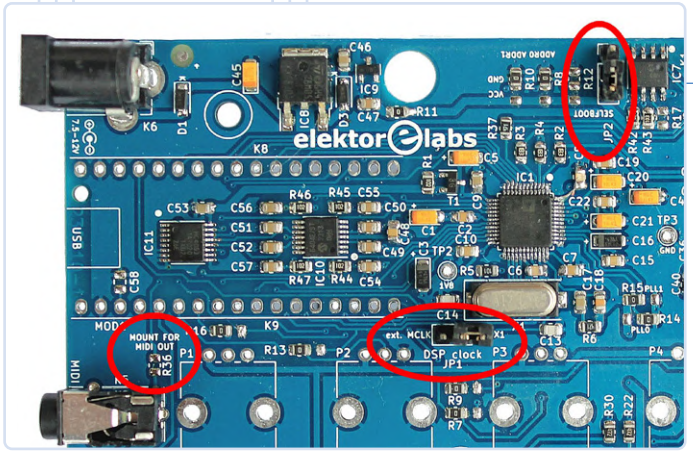


Bild 5. Die Positionen der Jumper JP1 (Mitte) und JP2 (oben). In der linken unteren Ecke finden Sie R36, der den MIDI-Ausgang aktiviert.

über I²S an den ESP32, wo es verarbeitet wird. Das Ergebnis wird an den ADAU1701 zurückgeschickt, wiederum über I²S. Der ADAU1701 kümmert sich um die Digital-zu-Analog-Wandlung und gibt bis zu vier analoge Audiosignale aus. Der ADAU1701 kann natürlich seine eigene (Vor-)Verarbeitung hinzufügen. Die Effektparameter können ganz nach eigenem Gusto drahtlos, seriell, über MIDI, mit den Potentiometern und sogar über I²S gesteuert werden.

Sonstiges

Diese Konfiguration ist für Leute gedacht, die das Board erworben haben, aber kein Interesse an Audioverarbeitung haben. Setzen Sie JP1 in die Position *ext. MCLK* (Pin 2 und Pin 3) und JP2 auf Pin 1 und Pin 2 (nicht *Selfboot*), damit der DSP nicht zu viel Energie frisst. Das ESP32-Modul kann als Webserver, als USB-serielle MIDI-Brücke, als USB-serielle I²C-Brücke, als MIDI-zu-I²C-Wandler, als MIDI-zu-Analog-Wandler und umgekehrt, als 4-Kanal-Analog-Digital-Wandler, als IoT-Sensor-Dingsbums oder als LED-Blinker verwendet werden. Der eigenen Kreativität sind keine Grenzen gesetzt, wie man so schön sagt!

Parameter-Steuerung

Audioeffekte verfügen in der Regel über einen oder mehrere vom Benutzer steuerbare Parameter, mit denen der Klang oder der Effekt in Echtzeit angepasst werden kann. Der Audio-DSP-FX-Prozessor verfügt über mehrere Methoden, von denen die meisten gleichzeitig genutzt werden können.

I²C

Unabhängig von der verwendeten Konfiguration kann der DSP immer über I²C gesteuert werden, entweder über K1 oder über den ESP32. Da letzterer an denselben Bus angeschlossen ist, kann auch er über I²C gesteuert werden, falls Sie dies wünschen.

Potentiometer

Der Audio-DSP-FX-Prozessor kann entweder am DSP oder am ESP32 mit bis zu vier Potentiometern verbunden werden. Wenn sie an den DSP angeschlossen sind, können sie über die Hilfs-ADCs in SigmaStudio ausgelesen werden (ADC1 bis ADC4 im *GPIO block* von Tab *Register Control* oder im Tab *Hardware Configuration* eines Projekts). In diesem Fall müssen Sie R44 bis R47 entfernen.
Der meist bevorzugte und auch flexiblere Weg ist jedoch, die Potentiometer an den ESP32 anzuschließen. Das Gerät hat zwei analoge Ausgänge, die durch Multiplexing (IC10 und IC11) in vier Ausgänge umgewandelt werden und mit den Hilfs-ADCs des DSP verbunden sind (Pins MP9, MP2, MP3 und MP8). Dadurch kann der ESP32 die Hilfs-ADCs des DSP über die Potentiometer oder auf andere Weise zum Beispiel über MIDI-CC-Befehle oder drahtlos steuern.
Beachten Sie, dass die gemultiplexten analogen Ausgänge auch als (langsame) digitale Ausgänge verwendet werden können, die ein DSP-Algorithmus wie Schalter oder Taster behandelt.

MIDI

Der optisch isolierte Eingang des Boards (IC3) ist als MIDI-Eingang vorgesehen (kann aber natürlich auch für etwas anderes verwendet werden). Aus Platzgründen er auf der Platine als 3,5-mm-Klinkenbuchse (im MIDI-Bereich als TRS bekannt, von Tip, Ring, Sleeve) und nicht als 5-poliger DIN-Anschluss ausgeführt. Über den MIDI-Eingang können Sie den ESP32 und/oder den DSP mit einer Tastatur oder einer Bedienoberfläche steuern.
Wie gesagt, es ist auch ein MIDI-Ausgang vorhanden. Bringen Sie R36 (82 Ω) an, um den Ausgang zu aktivieren (**Bild 5**). Da der Wert von R36 ziemlich niedrig ist, sollten Sie vorsichtig mit dem sein, was Sie an K5 anschließen. Es muss sich um einen 4-poligen 3,5-mm-Klinkenstecker (TRRS) handeln und nicht um einen 2-poligen (Mono oder TS) oder 3-poligen Typ (Stereo oder TRS). Da der MIDI-Ausgang wahrscheinlich

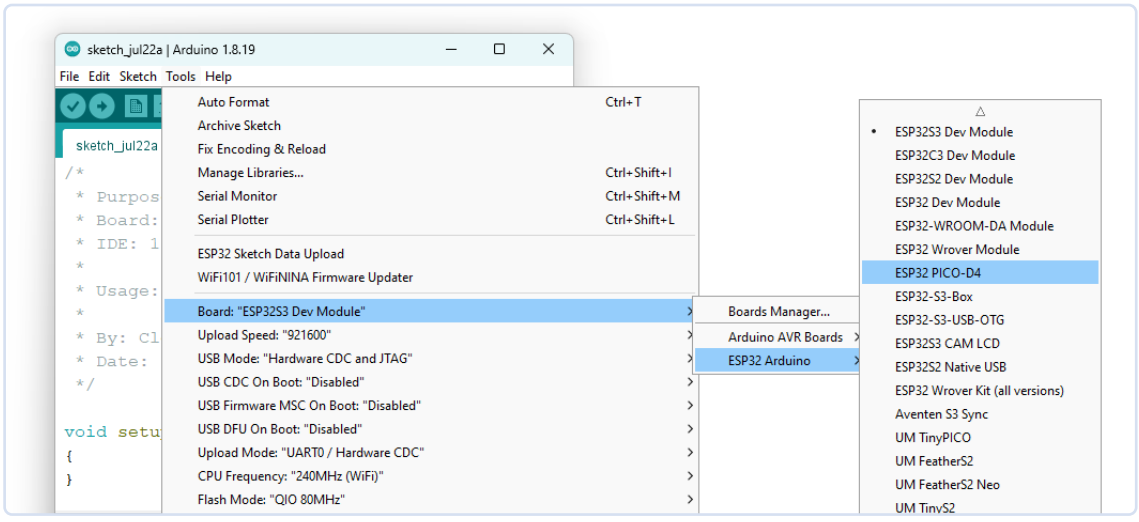


Bild 6. Der Audio-DSP-FX-Prozessor verwendet in der Arduino-IDE den ESP32 Pico-D4 als Board.

nicht von vielen Leuten benötigt wird, ist R36 standardmäßig nicht montiert, um eine Beschädigung des ESP32 durch einen falschen Steckverbinder zu verhindern.

USB Seriell

Der USB-Verbinder am ESP32-Pico-Kit ist ein USB-zu-Seriell-Anschluss. In Arduino ist er als serielle Standardschnittstelle (auch bekannt als *Serial*) verfügbar. Ein Computer kann diesen Port nutzen, um mit dem ESP32 zu kommunizieren, der Nachrichten an den DSP über I²C oder über die analogen Steueranschlüsse (MP2, MP3, MP8 und MP9) oder andere MP-Pins weiterleiten kann. Die serielle Schnittstelle kann auch als MIDI- oder I²C-Brücke (an K1) verwendet werden.

Drahtlos

Eine der Hauptattraktionen des ESP32 ist natürlich seine Drahtlos-Fähigkeit. Das ESP32-Pico-Kit unterstützt Wi-Fi 802.11b/g/n, Bluetooth v4.2 BR/EDR, und Bluetooth LE. Für Audioanwendungen ist die Bluetooth-Funktionalität besonders interessant, da sie die Verwendung des Boards als Bluetooth-Lautsprecher (Treiber oder „Sink") ermöglicht, aber auch die Verwendung als Bluetooth-Audioquelle ist denkbar.

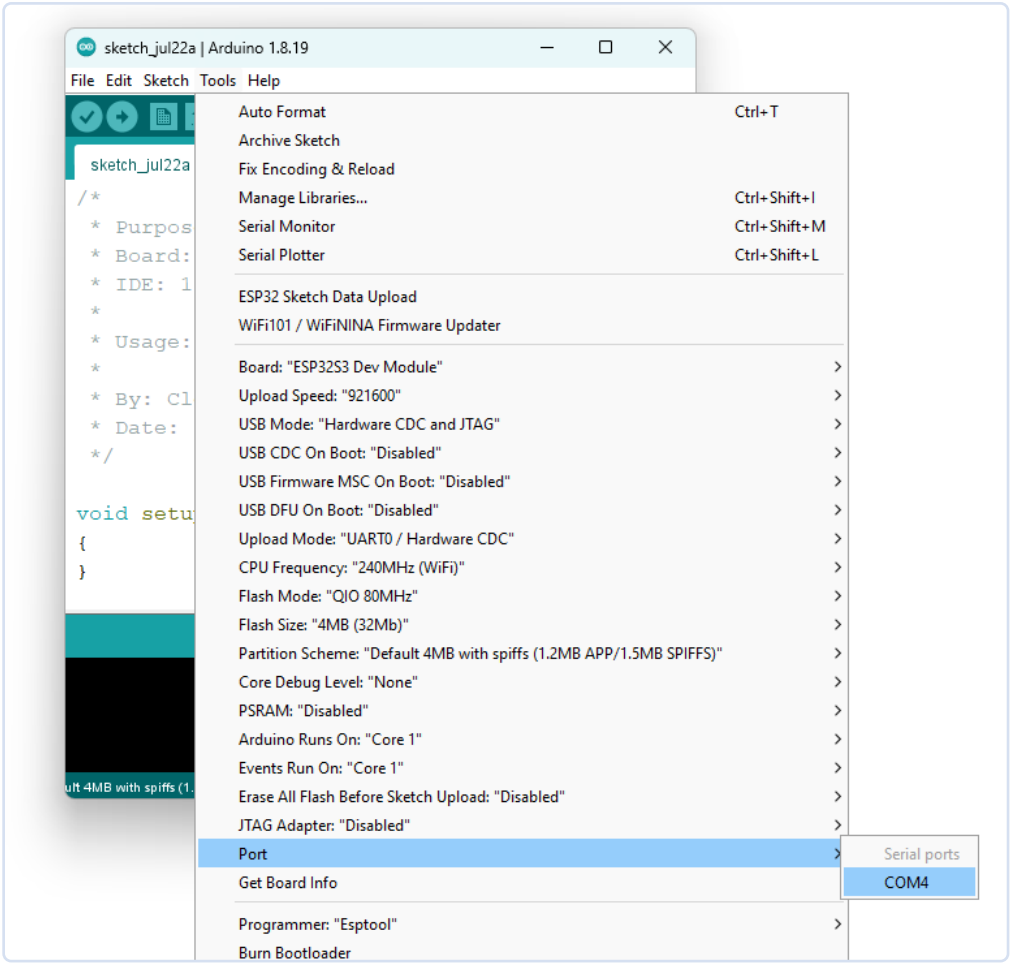


Bild 7. Wählen Sie den seriellen Port, an dem das ESP32-Modul angeschlossen ist.

Schritte zum ersten Start

Bei Auslieferung mit leerem EEPROM macht das Board gar nichts, wenn Sie es einschalten. Der erste Schritt zur Inbetriebnahme ist, ein Programm in das EEPROM zu laden. Es gibt mehrere Möglichkeiten, dies zu tun, aber die einfachste ist die Verwendung des ESP32-Pico-Kits. Folgen Sie den folgenden Schritten.

Bereiten Sie die Platine vor

- Stecken Sie das ESP32-Pico-Kit-Modul so auf die Hauptplatine, dass der USB-Anschluss zur Seite zeigt und die Antenne in die Mitte der Hauptplatine.
- Setzen Sie einen Jumper auf Pin 2 und Pin 3 von JP2 (*Selfboot*).
- Auf JP1 (*DSP Clock*) muss ein Jumper gesetzt werden, dessen Position jedoch von der Anwendung abhängt. Pin 1 und Pin 2 (*X1*) wählen den Quarz X1 für Anwendungen, bei denen der ESP32 den DSP nicht takten muss, wahrscheinlich alle, die keine I²S-Kommunikation zwischen dem DSP und dem ESP32 verwenden. JP1 in Position Pin 2 und Pin 3 (*ext. MCLK*) wählt das MCLK Signal des ESP32 als Taktgeber für den DSP. Diese Position ist für die I²S-Kommunikation zwischen dem ESP32 und dem DSP erforderlich.
- Verbinden Sie den Micro-USB-Anschluss des ESP32-Pico-Kit mit einem freien USB-Anschluss am Computer. Die Power-LED des ESP32-Pico-Kit sollte rot aufleuchten und der Computer einen neuen seriellen Anschluss erkennen. Wenn der Port nicht gefunden wird, installieren Sie den Treiber für den USB-zu-Seriell-Wandler CP2101 auf dem ESP32-Pico-Kit, wie [3] erläutert.

Bereiten Sie Ihren Computer vor

- Starten Sie die Arduino-IDE (dieses Projekt wurde mit der IDE-Version 1.8.19 entwickelt).
- Wählen Sie im Menü *Werkzeuge* das Board *ESP32 PICO-D4* (**Bild 6**). Wenn der ESP32 PICO-D4 nicht in der Liste der Boards aufgeführt ist, installieren Sie zuerst im *Boardverwalter* das Paket *ESP32* von Expressif. Details dazu finden Sie in der Anleitung unter [2]. Es ist sehr empfehlenswert, eine Version vor 3.0.0 zu installieren (zum Beispiel 2.0.17), da bestimmte Treiber in Version 3.0.0 komplett überarbeitet wurden (zum Beispiel I²S, ADC und DAC). Wir haben auch beobachtet, dass Anwendungen, die auf Version 3.0.x. basieren, den Code aufblähen und nicht mehr in den Speicher des ESP32-Moduls passen. Die Installation dürfte eine Weile dauern, bis andere Bibliotheken, die diese Peripheriegeräte verwenden, die Änderungen integriert haben.
- Sobald das Boards-Package installiert ist, sollten Sie den *ESP32 PICO-D4* auswählen können.
- Wählen Sie im Menü *Werkzeuge* den richtigen Port aus (**Bild 7**).
- Öffnen Sie in der Arduino-IDE den *Bibliotheksverwalter* (*Werkzeuge → Bibliotheken verwalten...*). Suchen Sie nach *Elektor*. Sie sollten eine Bibliothek namens *Elektor_AudioDSP* finden (**Bild 8**), die Sie installieren. Standardmäßig wird die aktuelle Version installiert, und es gibt normalerweise keinen Grund, eine ältere Version zu verwenden, es sei denn, Sie wollen mehr Bugs und weniger Optionen. Die Bibliothek kann auch von GitHub unter [4] heruntergeladen und manuell installiert werden.

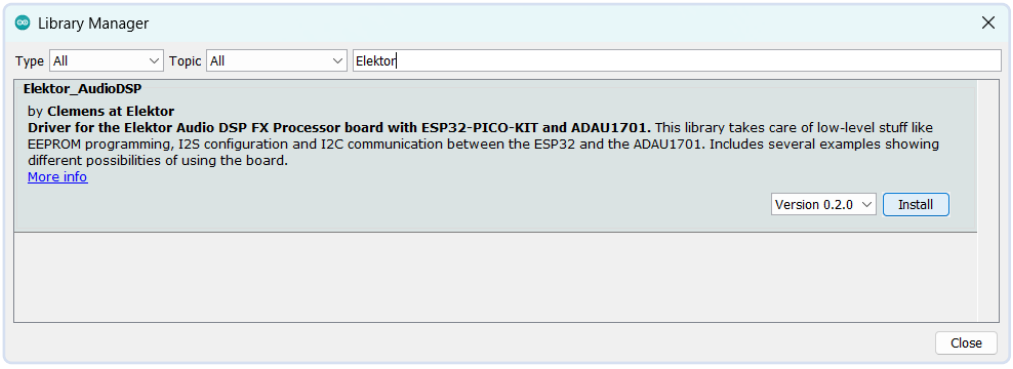


*Bild 8. Installieren Sie die Bibliothek **Elektor_AudioDSP** mit Hilfe des Bibliotheks-Managers der Arduino-IDE.*

Anwendungsbeispiele

Sie sind nun bereit, Programme zu erstellen und in den Audio-DSP-FX-Prozessor zu laden. Um Ihnen den Einstieg zu erleichtern, wird die *Elektor_AudioDSP*-Bibliothek mit einer Sammlung von Beispielen geliefert. Öffnen Sie ein Beispiel, indem Sie auf *Datei → Beispiele* klicken und nach unten zum Abschnitt *Examples from Custom Libraries* scrollen. Hier sollten Sie einen Eintrag für die *Elektor_AudioDSP*-Bibliothek sehen. Klicken Sie diesen an und wählen Sie ein Beispiel aus (**Bild 9**). Einige Einträge zeigen einen Pfeil nach rechts (zum Beispiel *AudioTools*), die eine Drittanbieter-Bibliothek mit dem Namen des Eintrags erfordern. Das bedeutet, dass die Beispiele im Untermenü *AudioTools* die Bibliothek *AudioTools* erfordern. Einige dieser Bibliotheken können wie oben beschrieben über den Bibliotheksverwalter der IDE installiert werden, aber nicht alle. Der Link zur Bibliothek ist im Sketch enthalten.

Ein Beispiel besteht aus einem Arduino-Sketch und in den meisten Fällen einer ausführbaren Datei für den DSP, die in das EEPROM des Boards geladen wird. Die Kommentare am Anfang des Sketches sagen Ihnen, wie Sie die Jumper des Boards setzen müssen und wie Sie das Beispiel verwenden. Das Beispiel kümmert sich dann um alles. Laden Sie einfach einen Sketch und übertragen Sie ihn auf das Board. Wenn das EEPROM programmiert werden muss, wird der Sketch dies automatisch tun.

Wichtig: Bitte lesen Sie die Kommentare am Anfang eines Beispielsketches aufmerksam, da sie Informationen zur Konfiguration des Boards enthalten!

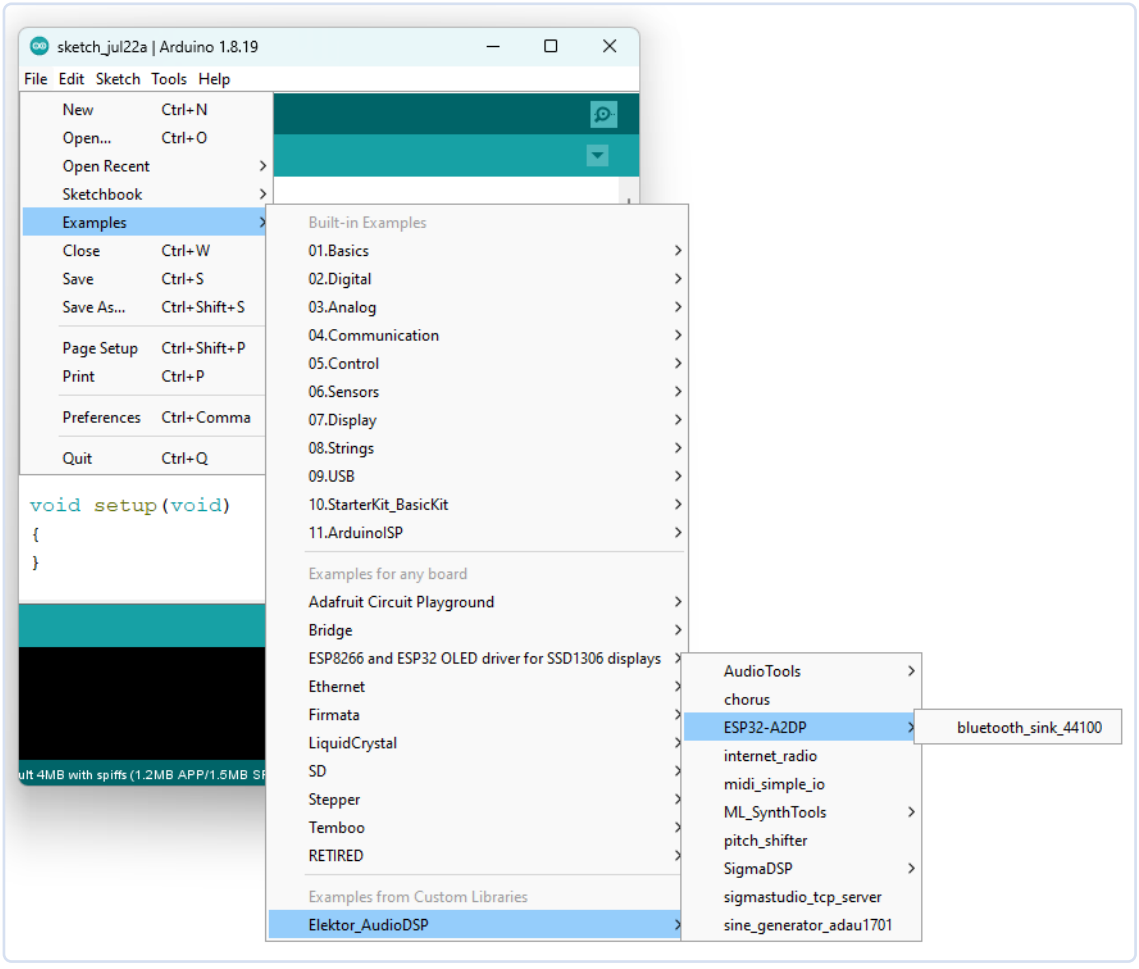


*Bild 9. So greifen Sie auf die in der Bibliothek **Elektor_AudioDSP** enthaltenen Beispiele zu.*

Ein Beispiel ausprobieren

Um die Verwendung eines Beispiels zu veranschaulichen, laden wir *sine_generator_adau1701*. Nachdem wir diesen Sketch auf das Board geladen haben, wird er das EEPROM (auch bekannt als *E2Prom*) mit dem DSP-Algorithmus *i2s_pass_through_48000* programmieren. Der Name verrät es nicht, aber dieser Algorithmus verwandelt den DSP in einen spannungsgesteuerten Sinusgenerator, dessen Ausgang am Anschluss K4 (nicht K3) liegt. Die Frequenz des Oszillators wird von P1 gesteuert, der mit dem ESP32 verbunden ist. In der Hauptschleife werden die vier Potentiometer ausgelesen und ihre Werte über die serielle Schnittstelle ausgegeben. Diese Werte werden auch als Spannungen an die Steuereingänge des DSP gesendet. Nach dem Programmieren des EEPROMs (dies dauert etwa eine Sekunde) beginnt die LED auf der Platine im Sekundentakt zu blinken. Wenn Sie den Sketch zurücksetzen, wird das EEPROM nicht erneut programmiert (es sei denn, sein Inhalt ist anders), und die LED blinkt fast sofort nach dem Zurücksetzen. Hier sind die Hinweise (aus dem Sketch), damit das Ganze funktioniert:

- Stellen Sie JP1 (*DSP clock*) auf die Position *X1* (Pin 1 und Pin 2)
- Stellen Sie JP2 auf die Position *Selfboot* (Pin 2 und Pin 3)
- Stellen Sie mit P5 TP1 auf 3,15 V ein
- Laden Sie den Sketch auf den ESP32 hoch
- Warten Sie, bis LED1 mit einer Frequenz von 1 Hz zu blinken beginnt
- Schließen Sie Kopfhörer oder einen Verstärker an K4 (nicht K3) an und genießen Sie die Musik
- P1 steuert die Frequenz

SigmaStudio-Beispiele

Die Beispiele, die ein DSP-Programm verwenden, enthalten auch das korrespondierende SigmaStudio-Projekt [5] (**Bild 10**). Nach der Installation der *Elektor_AudioDSP*-Bibliothek finden Sie die Beispiele in:

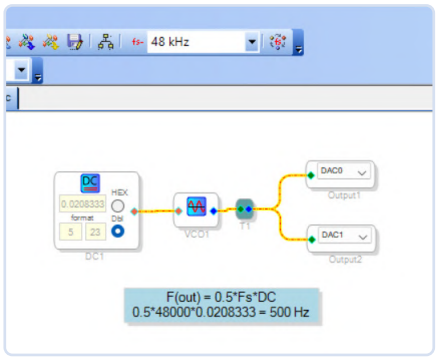


Bild 10. Ein Programm von SigmaStudio [5] ist eigentlich ein Flussdiagramm.

```
[Pfad-zu-Ihrem-Arduino-Ordner]\sketchbook\libraries\
Elektor_AudioDSP\examples\
```

Eine Sammlung von vorkompilierten DSP-Programmen finden Sie in der Datei *adau1701_e2prom_collection.h*, die in der *Elektor_AudioDSP*-Bibliothek enthalten ist. Die SigmaStudio-Projektdateien, die zur Erzeugung dieser Executables verwendet werden, befinden sich im Ordner *extra* der Bibliothek.
Enthalten sind zwei generische Executables, die einfach Audiodaten vom ESP32 zum ADAU1701 über I²S weiterleiten: *i2s_pass_through_44.1khz* und *i2s_pass_through_48khz*. Der einzige Unterschied zwischen ihnen ist die Abtastrate. Diese beiden Executables verwandeln den DSP in einen Stereo-Audioausgang am Anschluss K3 (mit einem Sinusgenerator am Anschluss K4). JP1 muss sich in der Position *ext. MCLK* befinden.

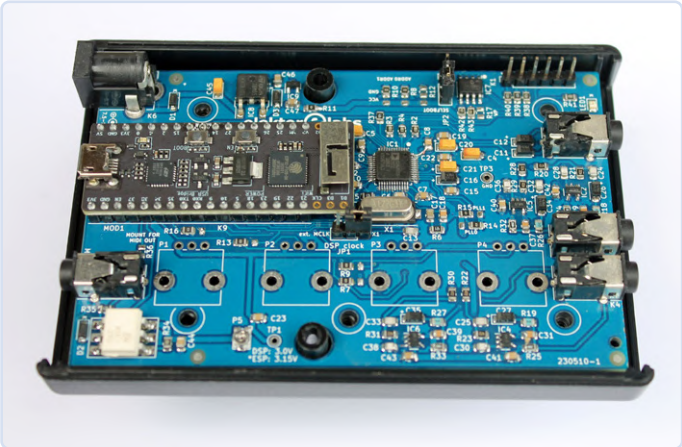


Bild 11. Der Audio-DSP-FX-Prozessor passt in ein Hammond-Gehäuse vom Typ 1593N. Um den Deckel schließen zu können, muss das ESP32-Modul aber ohne Stiftleisten montiert werden.

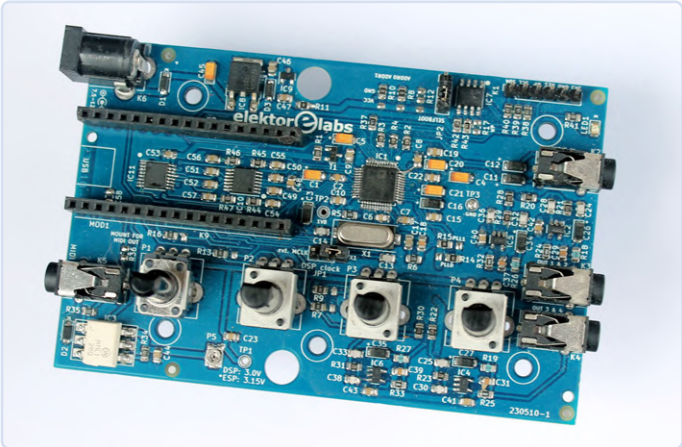


Bild 12. Die Platine mit montierten Headern und Potentiometern.

To Be Continued...

Das war's für den Moment. Dieser Artikel enthielt viele Informationen und hoffentlich genug, um Ihnen den Einstieg zu erleichtern. In der nächsten Folge werden wir uns eingehender damit beschäftigen, wie man eine eigene Anwendung für das Audio-DSP-FX-Prozessor-Board erstellt.

RG – 230510-02

Sie haben Fragen oder Kommentare?

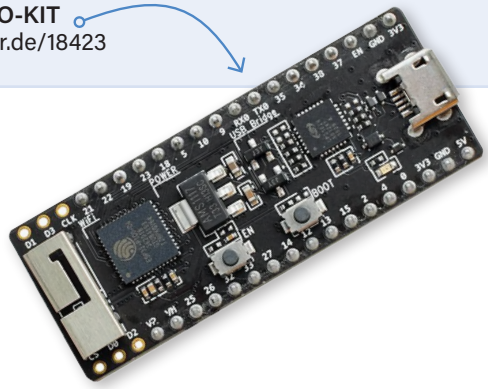
Haben Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Schicken Sie bitte eine E-Mail an den Autor unter clemens.valens@elektor.com oder kontaktieren Sie die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.

Über den Autor

Clemens Valens arbeitet seit 2008 bei Elektor und hatte seitdem verschiedene Positionen inne. Derzeit ist er Mitglied des Produktentwicklungsteams. Seine Hauptinteressen im Bereich Elektronik sind (digitale) Signalverarbeitung und deren Anwendungen in der Musikproduktion und Klangsynthese.

Passende Produkte

- **Elektor Audio DSP FX-Prozessor**
  www.elektor.de/20895
- **Dogan und Ahmet Ibrahim, *Practical Audio DSP Projects with the ESP32*, (Elektor, 2023)**
  Taschenbuch, englisch: www.elektor.de/20558
  E-Buch, PDF, englisch: www.elektor.de/20559
- **ESP32-PICO-KIT**
  www.elektor.de/18423



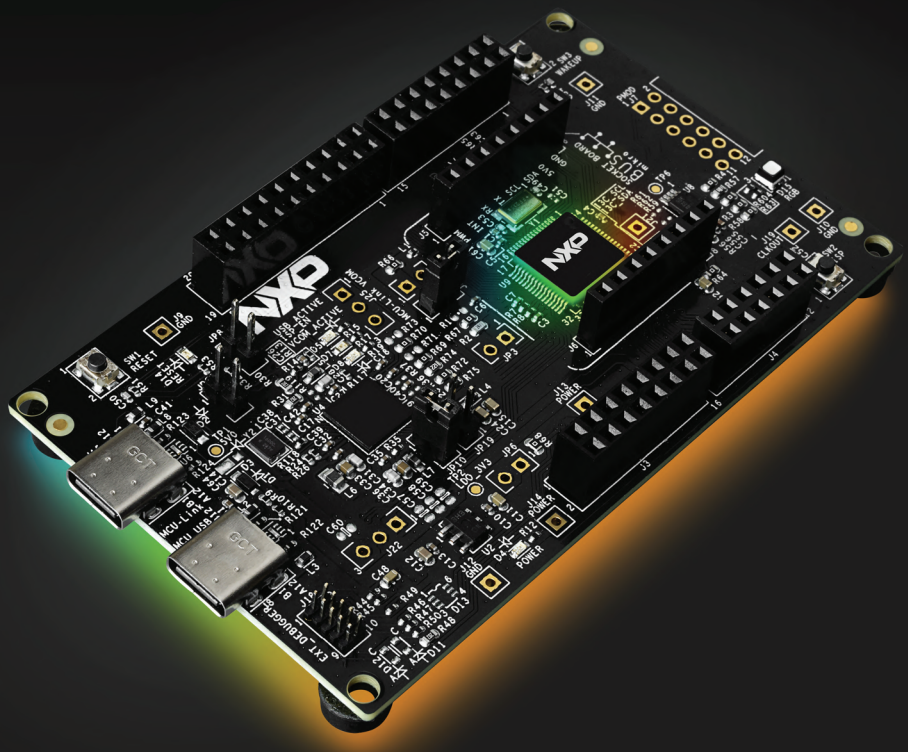
WEBLINKS

[1] Ramkumar Ramaswamy, „Universelles Audio-DSP-Board", Elektor 1-2/2014: https://www.elektormagazine.de/magazine/elektor-201401/24315
[2] ESP32 FAQ, How-to & Getting Started: https://www.elektormagazine.de/esp32-faq
[3] VCP-Treiber für USB-nach-UART-Brücke CP210x: https://www.silabs.com/developers/usb-to-uart-bridge-vcp-drivers
[4] Die Bibliothek Elektor_AudioDSP auf GitHub: https://github.com/ClemensAtElektor/Elektor_AudioDSP
[5] Download SigmaStudio (nicht SigmaStudio+): https://t1p.de/ynprh
[6] Audio-DSP-FX-Prozessor bei Elektor-Labs: https://www.elektormagazine.de/labs/audio-dsp-fx-processor

NXP

FRDM Development Boards

Design ohne grenzen.



nxp.com/FRDM

NXP und das NXP-Logo sind Marken von NXP B.V. Alle anderen Produkt- oder Dienstleistungsnamen sind Eigentum der jeweiligen Inhaber. ©2024 NXP B.V.

50 JAHRE

Elektor in englischer Sprache

Von Brian Tristam Williams (Elektor)

Seitdem Elektor 1974 seine englische Ausgabe auf den Markt gebracht hat, ist es eine Anlaufstelle für alle, die sich mit Elektronik beschäftigen wollen. Vom SC/MP-Computer in den 70er Jahren bis hin zu den heutigen KI- und IoT-Projekten hat das Magazin stets praktische, innovative Designs in die Hände von Bastlern und Profis gelegt. Heute, 50 Jahre später, gibt Elektor den Machern mit jeder neuen Ausgabe immer noch die Werkzeuge zum Erforschen, Bauen und Innovieren an die Hand.

Die Reise von *Elektor* begann 1961, als Bob W. Van der Horst die niederländische Zeitschrift *Electronica Wereld* herausgab (**Bild 1**), doch erst mit der Einführung der englischen Ausgabe im Dezember 1974 (**Bild 2**) wurde der Einfluss der Zeitschrift weltweit ausgeweitet. In den letzten fünf Jahrzehnten war *Elektor* eine unverzichtbare Ressource für Elektronikbegeisterte und bot praktische Projekte an, die Bastler und Profis gleichermaßen zum Bauen, Lernen und Innovieren befähigten.

Bild 1. Wie alles begann - die erste Ausgabe der niederländischen Zeitschrift Electronica Wereld im April 1961.

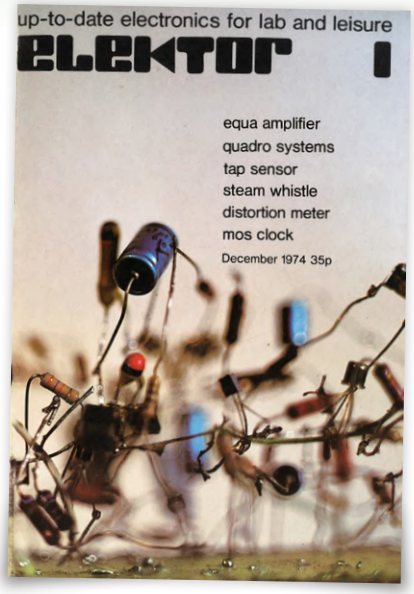


Bild 2. 13 Jahre später startet Elektor in englischer Sprache.

Die Anfänge von Elektor: Eine Gemeinschaft von Makern

Die Zeitschrift konzentrierte sich auf praktische Elektronikprojekte und bot Bastlern und Profis gleichermaßen die Möglichkeit, modernste Elektronik zu Hause zu erforschen. Besonders beliebt war der DIY-Ansatz mit detaillierten Schaltungsentwürfen und Platinenlayouts, die den Lesern zum Nachbau der Projekte zur Verfügung standen.

Die englische *Elektor*-Ausgabe wurde mit einem Vorwort von Van der Horst eröffnet, das wie folgt begann:

„Dies ist die erste englische Ausgabe von Elektor, einer Zeitschrift, die eine neue Art der Präsentation von Elektronik vorstellt. Die niederländische Ausgabe von Elektor erscheint seit über 14 Jahren und die deutsche seit über 4 Jahren. Jeden Monat finden 120.000 Exemplare ihren Weg zu ihren Lesern, die von begeisterten Amateuren bis zu professionellen Elektronikern reichen." [1]

Jetzt konnte *Elektor* ein weltweites Publikum erreichen und wurde schnell zu einer führenden Informationsquelle für Ingenieure, Studenten und Bastler.

Eine neue Ära der DIY-Elektronik

Die englische *Elektor*-Ausgabe kam gut an und konzentrierte sich weiterhin auf ehrgeizige, praktische Projekte, die den Zugang zu hochmoderner Elektronik demokratisierten. Das Redaktionsteam ermutigte Bastler, ihre eigene unverzichtbare Ausrüstung

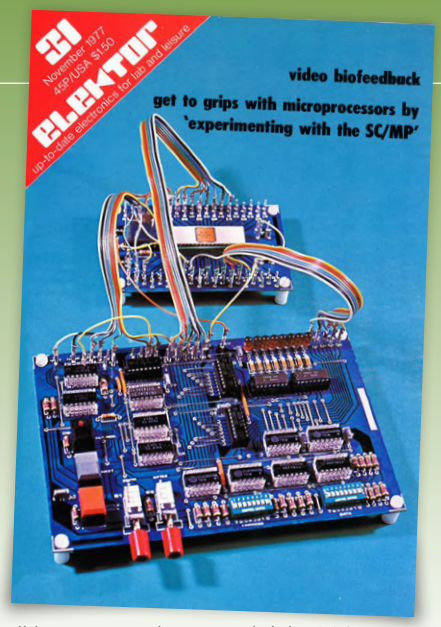


Bild 3. Im November 1977 wird der SC/MP-Computer vorgestellt.

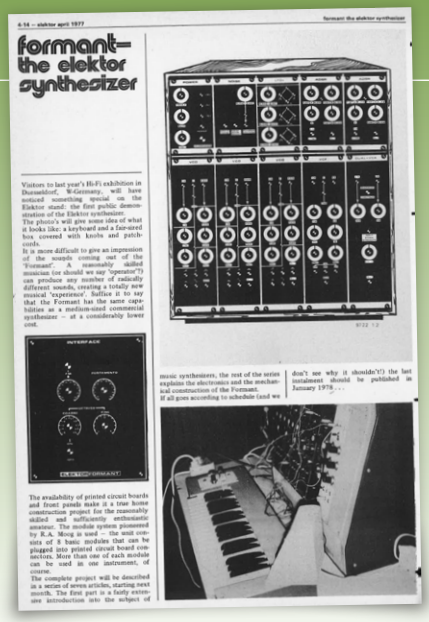


Bild 4. Der Elektor-Musiksynthesizer Formant ist auch heute noch eine Ikone.

Bild 5. Die Elektor TV Games Machine trat gegen Atari und Intellivision an.

für ihren Arbeitsbereich zu bauen. Das Elektorskop (Dezember 1976)* ermöglichte es dem Leser, ein Oszilloskop zu bauen - ein unverzichtbares Werkzeug jedes Elektroniklabors, das aber zu jener Zeit für Hobby-Bastler normalerweise zu teuer war [2].

Eines der ersten legendären Projekte war der SC/MP-Computer (**Bild 3** - November 1977). Er führte Hobbyisten in die Mikroprozessortechnologie ein und ermöglichte ihnen den Bau eines eigenen Computers zu einer Zeit, als Personal Computer noch nicht sehr weit verbreitet waren. Dieses Projekt, das auf dem SC/MP-Chip (Simple Cost-effective Micro Processor, SCAMP) von National Semiconductor basierte, war ein Durchbruch für viele Bastler, die zu einer Zeit, als es kaum Computer für den Hausgebrauch gab, die Computertechnik kennenlernen wollten [3].

Und es war nicht alles digital, im Gegenteil. Das Musik-Synthesizer Formant wurde ab Mai 1977 in einer Serie veröffentlicht (**Bild 4**) [4]. Mit genügend Teilen, um ein ganzes Buch zu füllen (was dann auch geschah), richtete sich die Serie an die aufkommende Welt der elektronischen Musik. Dieser analoge DIY-Synthesizer „brach die Regeln“ und wurde zum bestimmenden Projekt für Musiker und Hobbyisten gleichermaßen, da er es ihnen ermöglichte, Sounddesign an ihrer eigenen Werkbank zu erforschen. Der Bausatz ist heute legendär, denn Influencer wie „Look Mum No Computer“ haben diesen vergrabenen Schatz wiederentdeckt und sprachen mit uns in einer Folge *von Elektor Engineering Insights* [5] im Juli 2024 darüber.

Die Elektor TV Games Machine (**Bild 5** - April 1979) fing die Begeisterung der frühen Videospielrevolution ein. Sie ermöglichte es den Lesern, ihre eigenen Spielkonsolen zu bauen, komplett mit Kassetten! [6]

Als in den 1980er Jahren die Mikrocomputer aufkamen, war *Elektor* an der Spitze dieser Bewegung. Der Junior Computer (**Bild 6** - Mai 1980), ein 6502-basierter Bausatz, setzte neue Maßstäbe. Mit 1 KB RAM und 1 KB ROM erlaubte dieser einfache Computer den Benutzern, ihre eigenen Programme zu schreiben und die Mikroprozessortechnologie hautnah zu erleben. Es handelte sich nicht nur um Bausätze, sondern um Lehrmittel, die das wichtiger werdende Gebiet der Informatik entmystifizierten. [7]

In der analogen Audiowelt wurde der Mini-Crescendo-Verstärker (1984) zu einer Basis-Schaltung für Audiophile. Das Design bot den Nutzern ein leistungsstarkes

Bild 6. Der Junior Computer war unser Titelbild im Mai 1980.

High-Fidelity-Audiosystem, das zu einem Bruchteil der Kosten von Consumer-Systemen von Grund auf gebaut werden konnte. [8]

Die Zeitschrift wurde auch dafür bekannt, mit ihren kühnen Projekten Grenzen zu überschreiten. Der ATN-Filmnet-Dekoder (Mai 1987) war eines der umstrittensten, da er eine Möglichkeit bot, Pay-TV-Kanäle zu hacken. Diese Kontroverse wurde gerne aufgegriffen, denn sie führte zum erstmaligen Ausverkauf der englischsprachigen *Elektor*-Ausgabe und zeigte, wie weit die Zeitschrift bereit war, für ihre Leser zu gehen, selbst in die Grauzonen der Elektronik [9]. Ein paar Ausgaben später haben wir die Schaltung bereits aktualisiert:

„Ob Sie es glauben oder nicht, aber ein paar Tage nachdem unsere Mai-Ausgabe an die Druckerei geschickt wurde, änderten die Techniker von ATN Filmnet das Verschlüsselungssystem des Senders.“

Das alles hatte ich gerade verpasst, als die 90er Jahre kamen und ich Elektor entdeckte. Ich war 16, als die September-Ausgabe in die Regale kam, und sie hatte genau das Projekt auf lager, das ich brauchte: Ich hatte einen reinen RGB-Arcade-Röhrenmonitor und die dazugehörige Steuerplatine in einen Holzschrank eingebaut und wollte darauf fernsehen und Videokassetten ansehen. Die Schaltung war der S-VHS/CVBS-zu-RGB-Konverter [10], ein Zweiteiler (**Bild 7** - Oktober 1990). Ich kaufte mein erstes *Elektor*-Heft, bestellte die Platine, baute die Schaltung und war seitdem süchtig nach Elektronik zum Selbermachen.

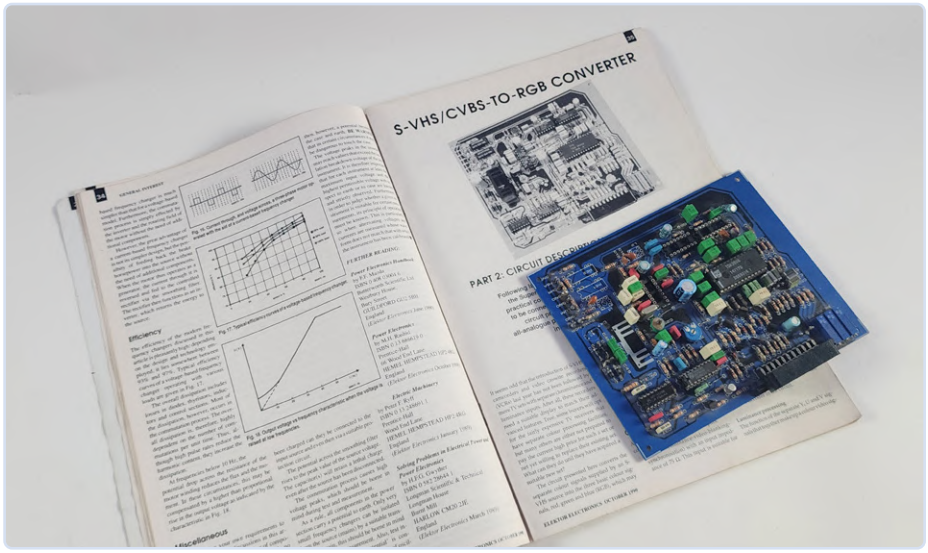


Bild 7. Ich habe immer noch mein erstes Elektor-Projekt, das 1990 als Zweiteiler veröffentlicht wurde.

Bild 8. Das Game Boy Digital Sampling Oscilloscope (GBDSO).

In den 90er Jahren erlebte das Internet eine explosionsartige Entwicklung. Obwohl es bereits seit 1983 für Enthusiasten an Universitäten existierte, wurde es mit der Schaffung des World Wide Web auch für Privatpersonen und Unternehmen attraktiv. *Elektor* erlebte die Einführung des Web 1.0 und deckte auch mehr computerbezogene Themen ab, indem es Anleitungen und Projekte anbot, die Computer mit anderer Elektronik verbanden. Der Filmnet-Decoder wurde beispielsweise mehrmals aktualisiert, als sich die TV-Verschlüsselungssysteme weiterentwickelten, was die Anpassungsfähigkeit von Elektor beim Spiel des „Überlebens des Stärkeren" zeigt.

Im Jahr 2000 erhielt das Thema Mess- und Testgeräte eine weitere große Aufmerksamkeit in Form des Game Boy Digital Sampling Oszilloskop (GBDSO) (**Bild 8** - Oktober 2000). Es ermöglichte den Lesern, alltägliche Geräte wie den Nintendo Game Boy in ein leistungsstarkes Laborwerkzeug zu verwandeln [11].

Elektor setzte weiterhin auf die Revolution der Mikrocontroller. Obwohl Mikrocontroller seit dem TMS1000 von Texas Instruments aus dem Jahr 1971 bekannt waren, gab es eine Zeitspanne von ein paar Jahren, in der sie sich etwas außerhalb der Reichweite von Hobbyelektronikern bewegten. Computer wechselten von DOS-ähnlichen Schnittstellen und RS-232 zu geschützten grafischen Benutzeroberflächen und USB, was die Programmierung zu einem teuren, proprietären Unterfangen machte... Bis Arduino im Jahr 2005 Mikrocontroller in die Hände der Hobbyelektroniker zurückbrachte. Arduino richtete sich an Künstler, Entwickler und Bastler sowie an alle, die an interaktiven Anwendungen interessiert sind. [12]

In dieser Zeit erlebte die Open-Source-Hardware einen Aufschwung, und *Elektor* veröffentlichte zahlreiche Arduino-basierte Projekte, die es Makern ermöglichten, mit eingebetteten Systemen zu experimentieren. Es entstand eine Fülle von Projekten mit Namen, die auf „ino" enden - ein Beispiel das Projekt „Arduino + Theremin = Theremino" (**Bild 9** - November 2009) [13]. Nachdem Arduino Mikrocontroller wieder cool gemacht hatte, gab es immer noch eine Marktlücke: In den 80er Jahren konnte man einen Computer kaufen, ihn mit nach Hause nehmen, ihn an den Fernseher anschließen und lernen, wie man ihn sofort zum Laufen bringt. Dann kam der Raspberry Pi: Genau wie ich vermisste Eben Upton dieses 80er-Jahre-Ethos und brachte den Raspberry Pi am Schalttag 2012 auf den Markt. *Elektor* verschwendete keine Zeit, und Eben wurde mit seinem Pi in der nächsten Ausgabe vorgestellt (**Bild 10** - April 2012) [14].

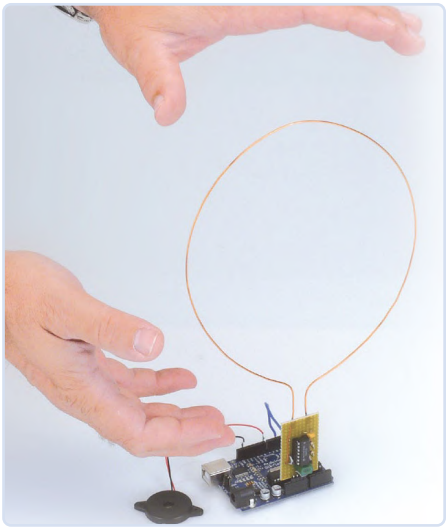


Bild 9. Der Theremino basiert auf dem Arduino.

Arduino und Raspberry Pi wurden in den 2010er Jahren von der Explosion des Internets der Dinge (IoT) begleitet, und *Elektor* bot schnell Projekte an, die diesen Trend aufgriffen. Von Hausautomatisierungssystemen bis hin zu drahtlosen Sensornetzwerken bot Elektor den Lesern die Werkzeuge, um vernetzte Geräte zu bauen.

Außerdem wurden Themen wie Embedded Linux behandelt, das den Lesern erschwingliche und flexible Entwicklungsplattformen bot. In diesem Jahrzehnt lebte die Do-it-yourself-Bewegung wieder auf, und *Elektor* ermutigte die Maker weiterhin, die Grenzen ihrer Möglichkeiten zu erweitern. Der edukative Schwerpunkt wurde erweitert, indem mehr Tutorien zu Mikrocontrollern wie dem STM32 sowie der FPGA-Entwicklung angeboten wurden, was das wachsende Interesse an eingebetteter Elektronik widerspiegelt.

In den 2020er Jahren hat Elektor seinen Fokus auf KI, Edge Computing und maschinelles Lernen erweitert. Die Leser konnten Projekte mit neuronalen Netzen und KI-gesteuerten Anwendungen erforschen

INTERVIEW

What are you Doing?

The Raspberry Pi $25 computer

By Wisse Hettinga (Elektor UK/INT Editorial)

Raspberry Pi is grabbing the attention with a $25 computer ($35 for a networked model). In the middle of the storm is Eben Upton. Why is he convinced that a computer with no casing, no keyboard, no hard disk and no screen, will be successful? It's time to put the question to him: "What are you Doing?"

There is no reason why a computer should cost more than 50 dollars'

Bild 10. Der erste Auftritt des Raspberry Pi in Elektor, April 2012.

und damit die Grenzen dessen, was Maker mit eingebetteter Elektronik erreichen können, verschieben.
Auch das Thema Nachhaltigkeit wurde mit Projekten zu erneuerbaren Energien, Solarenergie und energieeffizienten Systemen in den Mittelpunkt gerückt. Dies spiegelt die wachsende Bedeutung von umweltfreundlicher Elektronik und Nachhaltigkeit in der Maker-Community wider.

Die nächsten 50 Jahre

Auf dem Weg in die nächsten 50 Jahre liegt der Schwerpunkt weiterhin auf Innovation und der Zukunft der Technologie. Basismittel wie Oszilloskope und FPGA-Design sind *immer* noch aktuell, und *Elektor* deckt weiterhin spannende Bereiche wie IoT, eingebettete Systeme, KI, 3D-Druck, erneuerbare Energien und Quantencomputer ab, um nur einige zu nennen.
Dies sind neue Grenzen, die Hobbyisten erforschen können, und Elektor bleibt eine wichtige Ressource für Leser, die auf dem neuesten Stand bleiben wollen.

RG — 240557-02

**: Die Erscheinungsdaten und die Weblinks beziehen sich auf die englische Ausgabe von Elektor.*

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Haben Sie Fragen oder Anmerkungen zu diesem Artikel? Schreiben Sie bitte dem Autor eine E-Mail an brian.williams@elektor.com.

Passende Produkte

- **Elektor-Archive 197x-2023 (USB-Stick)**
  Englisch: www.elektor.com/20751
  Deutsch: www.elektor.de/20752

WEBLINKS

[1] Bob Van der Horst stellt Elektor den englischen Lesern vor: https://elektormagazine.com/magazine/elektor-197412/57329
[2] „Elektorscope", Elektor, Dezember 1976: https://elektormagazine.com/magazine/elektor-197612/57794
[3] „Experimenting with the SC/MP", Elektor, November 1977: https://elektormagazine.com/magazine/elektor-197711/58003
[4] „Formant, The Elektor Music Synthesizer", Elektor, Mai 1977: https://elektormagazine.com/magazine/elektor-197705/57847
[5] Reparatur des DIY-Magazin-Synthesizers Elektor Formant aus den 70ern (YouTube): https://youtu.be/02Ul4Jh84NI
[6] „µP TV Games", Elektor, April 1979: https://elektormagazine.com/magazine/elektor-197904/58316
[7] „Junior Computer", Elektor, Mai 1980: https://elektormagazine.com/magazine/elektor-198005/44396
[8] „Mini Crescendo - High-Class Medium Power Amplifier", Elektor, Mai 1984: https://elektormagazine.com/magazine/elektor-198405/45233
[9] „Decoding Satellite Tv Signals", Elektor, Mai 1987: https://elektormagazine.com/magazine/elektor-198705/47132
[10] „S-VHS/CVBS-to-RGB Converter", Elektor, September 1990: https://elektormagazine.com/magazine/elektor-199009/32220
[11] „GBDSO Gameboy Digital Sampling Oscilloscope", Elektor, Oktober 2000: https://elektormagazine.com/magazine/elektor-200010/16868
[12] „Lucky Dip: Design it yourself or copy from the Internet?", Elektor, April 2008: https://elektormagazine.com/magazine/elektor-200010/16868
[13] „Arduino + Theremin = Theremino", Elektor, November 2009: https://elektormagazine.com/magazine/elektor-200911/19200

WÜRTH ELEKTRONIK
MORE THAN YOU EXPECT

WE meet @ electronica
Halle A6 - 502

Ihr vertrauensvoller Partner für EMV-konformes Applikationsdesign
In unserer digitalen Welt ist es entscheidend, die richtige Frequenz anzuschlagen. Mit unseren umfangreichen Services, langjähriger Erfahrung und einem breiten Produktportfolio meistern wir gemeinsam Ihr EMV-konformes Applikationsdesign entlang des gesamten Produktlebenszyklus. Persönlich und vor Ort. Lassen Sie uns gemeinsam starten.
www.we-online.com/emc

Highlights
- Großes EMV-Produktportfolio
- Persönliche EMV-Design-Unterstützung
- REDEXPERT Design- und Simulations-Plattform

#CONDUCTINGEMISSIONS

KiCad 8

Neue und aktualisierte Funktionen

Von Peter Dalmaris (Australien)

KiCad, die Open-Source-Elektronik-CAD-Software, erfreut sich immer größerer Beliebtheit, auch bei professionellen Entwicklern. Und die Software wird ständig verbessert. Dieses Jahr wurde die KiCad-Version 8 veröffentlicht, die viele Verbesserungen gegenüber KiCad 7 bietet, insbesondere im Platinen-Editor und dem integrierten Simulator. Schauen wir uns einige dieser Aktualisierungen und Erweiterungen an!

Das KiCad-Team stellte Anfang 2024 KiCad 8 vor, fast genau ein Jahr nach KiCad 7. Nachdem das Projekt schon mit den Version 5 und Version 6 einen beeindruckenden Reifegrad erreicht hat, werden neue Hauptversionen von KiCad fast immer mit neuen Funktionen und Verbesserungen ausgeliefert, um die Produktivität zu steigern und die Lücke zur kommerziellen Konkurrenz zu schließen.

KiCad 8 ist da keine Ausnahme. Die neue Version [1] stellt den nächsten Schritt in der Entwicklung von KiCad dar und enthält mehrere Verbesserungen und Ergänzungen gegenüber KiCad 7. Wie bei KiCad 7 wird auch KiCad 8 Ihre älteren Projekte nicht zerstören, und es gibt keine neuen und radikal anderen Funktionen, wie damals das neue Dateiformat in KiCad 5. Sie brauchen keine Stunden oder gar Tage, um die in KiCad 8 neu aufgenommenen Funktionen zu erlernen. Sie könnten diesen Artikel eigentlich ignorieren (sollen es aber nicht :-)), KiCad 8 herunterladen und sofort loslegen. Ihr von KiCad 7 gewohnter Arbeitsablauf wird einfach weiter funktionieren.

Stattdessen gibt es in KiCad8 viele relativ kleine Verbesserungen. Die meisten dieser Verbesserungen betreffen die beiden Hauptanwendungen von KiCad, den Schaltplan- und den PCB-Editor, um deren individuelle Fähigkeiten und Integration zu verbessern. In diesem Artikel werde ich von einigen der wichtigsten Verbesserungen von KiCad 8 berichten, beginnend mit dem PCB-Editor.

Ziehen mehrerer Footprints

In KiCad 7 konnten Benutzer immer nur einen Footprint gleichzeitig ziehen. Das Ziehen mehrerer Footprints nach Abschluss der Verdrahtung, um ein Problem zu beheben oder eine Platine zu verbessern, war ein großer Zeitfresser, und ich habe mich immer davor gefürchtet, so etwas tun zu müssen. KiCad 8 ermöglicht es nun, mehrere Footprints auszuwählen und zusammen zu verschieben, ohne die angehängten Leiterbahnen zu unterbrechen. Dadurch wird der Entwurfsprozess rationalisiert, insbesondere bei komplexen Platinen mit zahlreichen Bauteilen.

Ich will diese Funktion am Beispiel eines ESP32-Boards demonstrieren. Sie möchten nun gerne die Position der Footprints D1...D4 verschieben (**Bild 1**). Das Verfahren ist intuitiv. Beginnen Sie mit der Auswahl der Footprints, die Sie verschieben möchten, indem Sie bei gedrückter *Strg*- oder *Cmd*-Taste auf die Footprints klicken oder mit der Maus, nachdem Sie im *Selection Filter* die Checkbox *Footprints* aktiviert haben. Wenn Sie dann die Taste *D* gedrückt halten, können Sie den Ziehvorgang mit der Maus starten. Wenn Sie die Maus bewegen, werden die zugehörigen Footprints verschoben.

Wenn Sie die ausgewählten Footprints verschieben, gibt der interaktive Router eine Rückmeldung, wenn eine Regelverletzung auftritt. Wenn das Verschieben der Footprints einen Kurzschluss verursacht, hebt der Router das Problem in hellem Grün hervor. Wenn im Beispiel D6 einen Kurzschluss verursacht, weil eine Leiterbahn das Diodenpad berührt, zeigt der Router dies sofort an, so dass schnelle

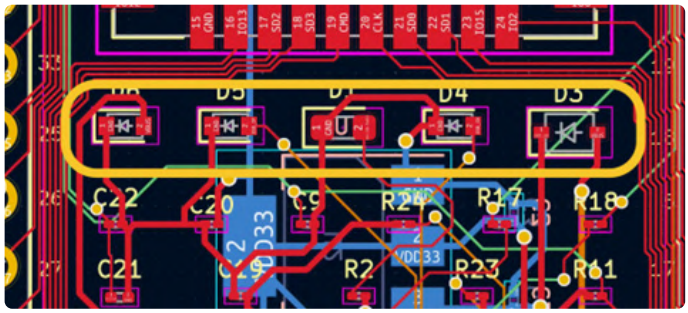


Bild 1. Ich werde diese Footprints gleichzeitig ziehen.

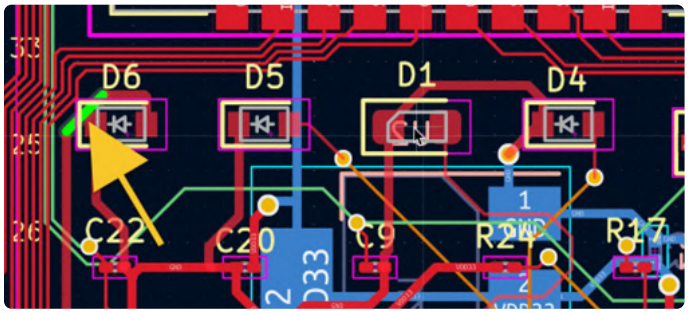


Bild 2. Wenn Sie mehrere Footprints ziehen, werden die Leiterbahnen neu gezeichnet, und der interaktive Router zeigt Regelverletzungen in Echtzeit an.

Anpassungen möglich sind. In **Bild 2** habe ich die Footprints etwas nach links gezogen, wodurch ein Kurzschluss verursacht wurde. Der interaktive Router hebt diese Verletzung hervor, indem er das betroffene Segment grün färbt.

Wenn Sie mit der neuen Position der Komponenten zufrieden sind, klicken Sie einfach, um sie an ihrem Platz abzulegen. Diese Funktion macht das Anordnen von Komponenten im Platinenlayout intuitiver und weniger zeitaufwändig. Die Fähigkeit von KiCad 8, mehrere Footprints gleichzeitig zu ziehen, erhöht so die Produktivität und macht kleinere (oder größere) Anpassungen mühelos möglich.

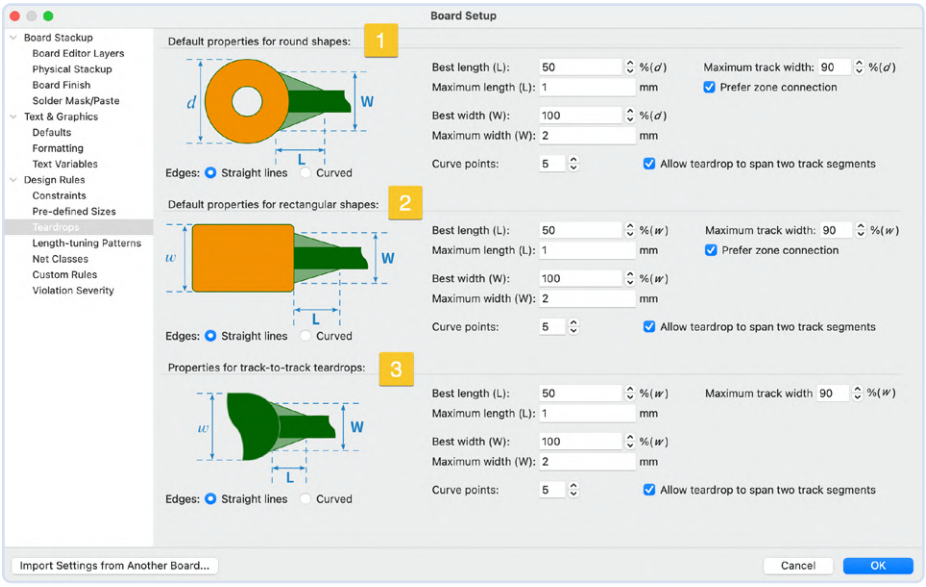


Bild 3. Die Teardrops*-Einrichtungsoptionen im #Board Setup#.*

Eigenschaften von Teardrops

Teardrops sind nicht neu, aber in KiCad 8 haben Sie mehr Möglichkeiten, sie hinzuzufügen. Teardrops verstärken die Verbindung eines Pads zu der Leiterbahn und verringern so das Risiko, dass sich die Leiterbahnen aufgrund mechanischer oder wiederholter thermischer Belastung ablösen und brechen. Die neue Funktion von KiCad 8 fügt eine sich verjüngende oder tropfenförmige Erweiterung an der Verbindung von Pads, Durchkontaktierungen und Leiterbahnen hinzu, wodurch die Haltbarkeit und Zuverlässigkeit der Platine verbessert wird und diese gleichzeitig professioneller aussehen lässt! Lassen Sie uns die wichtigsten Vorteile von Teardrops in Ihrem Platinenlayout sowie das Verfahren untersuchen, Teardrops mit KiCad 8 hinzuzufügen.

Einer der wichtigsten Vorteile von Teardrops ist die verbesserte Haltbarkeit und Zuverlässigkeit. Sie helfen bei der Bewältigung von mechanischen Wärmespannungen, indem sie der Kupferschicht mehr Fläche bieten, um sich mit dem Platinensubstrat zu verbinden, so dass es weniger wahrscheinlich ist, dass sich die Pads beim Löten ablösen. Dies kann passieren, da sich Kupfer und Epoxidharz des Substrats bei Hitzeeinwirkung unterschiedlich stark ausdehnen und zusammenziehen. Teardrops tragen auch zu einer besseren Herstellbarkeit bei. Sie schaffen breitere und robustere Verbindungen und verringern damit die Wahrscheinlichkeit von Defekten wie Unterbrechungen, die durch winzige Unvollkommenheiten während des Ätzvorgangs verursacht werden, insbesondere bei sehr feinen Leiterbahnen und Pads. Außerdem erhöhen sie die Reparierbarkeit Ihrer Platinen. Da sie mehr Kupfer an den Verbindungspunkten hinzufügen, erleichtern sie das Löten von Bauteilen an Pads oder Vias. Schließlich ist die Signalintegrität ein weiterer Bereich, in dem Teardrops vorteilhaft sind, insbesondere bei Hochfrequenzschaltungen. Scharfe Ecken in Leiterbahnen können Signalreflexionen verursachen; Teardrops dagegen bieten glattere Übergänge, die zu einer saubereren Signalübertragung beitragen. Andererseits sind diese Hochfrequenzentwürfe oft auf Leiterbahnen mit sorgfältig berechneter Impedanz angewiesen, und Teardrops könnten diese Berechnungen unbeabsichtigt beeinträchtigen oder unerwünschte Effekte erzeugen. Daher muss der Einfluss von Teardrops bei manchen Entwürfen kritisch betrachtet werden.

In KiCad können Sie die Eigenschaften für Teardrops auf dem *Teardrops*–Tab in der Liste *Design Rules* im *Board Setup* einstellen. Die Eigenschaften sind in **Bild 3** dargestellt. Sie können die gewünschten Einstellungen für Teardrops, die an kreisförmigen und rechteckigen Pads angebracht sind und die Verbindungen zu den Leiterbahnen als Standard festlegen. Es ist möglich, Teardrops zu neuen und zu bestehenden Entwürfen hinzuzufügen. Lassen Sie uns Teardrops für eines der Projekte (den MCU-Datalogger) aus dem zweiten Band (4. Auflage) von *KiCad Like a Pro: Projects and Recipes* [2] setzen. Derzeit hat dieses Projekt einfache Verbindungen von den Leiterbahnen zu den Pads, doch ich will mit den kreisförmigen Pad-Teardrop-Verbindungen aus Bild 3 arbeiten. In **Bild 4** sehen Sie die ursprünglichen Pads auf der linken und den gleichen Entwurf nach Anwendung von

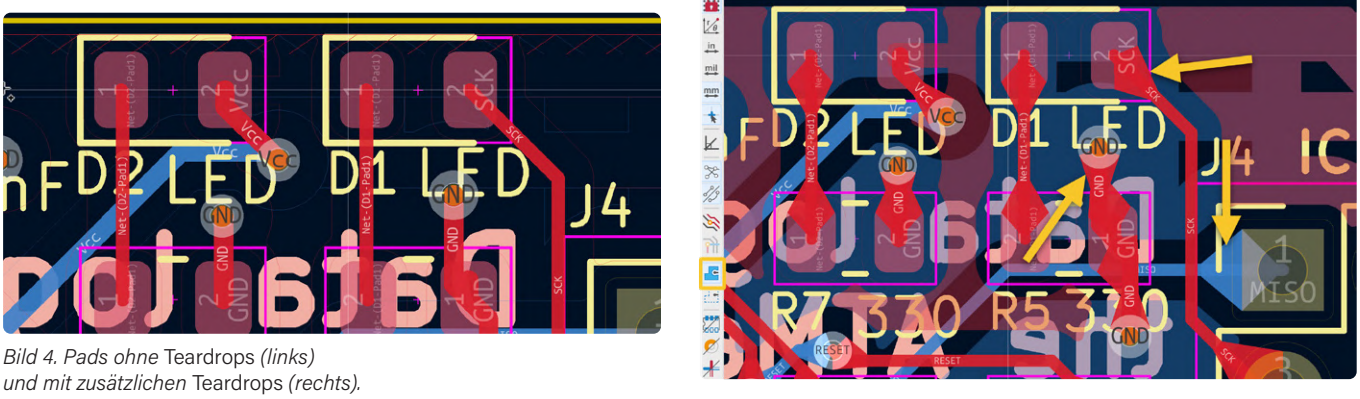


Bild 4. Pads ohne Teardrops *(links) und mit zusätzlichen* Teardrops *(rechts).*

Teardrops auf der rechten Seite.
Obwohl Teardrops mehrere Vorteile beim Platinenentwurf bieten, gibt es doch Situationen, in denen sie nicht die beste Wahl sind. Bei platzbeschränkten Entwürfen, insbesondere bei Platinen mit hoher Dichte, zählt jeder Millimeter. Der zusätzliche Platz, den Teardrops beanspruchen, kann die Möglichkeit einschränken, Bauteile zu platzieren oder Leiterbahnen effizient zu verlegen, was Teardrops in einigen Fällen unpraktisch macht.

Rastergröße überschreiben

Diese Funktion ist neu in der achten Version von KiCad. Mit Rasterüberschreibungen schaltet KiCad automatisch auf eine bestimmte Rastergröße um, wenn Operationen wie das Verschieben oder Platzieren von Objekten im Schaltplaneditor durchgeführt werden. Der Knopf *Grid Overrides* in der linken Symbolleiste ermöglicht es Ihnen, diese Funktion zu aktivieren oder zu deaktivieren.
Das Tolle an dieser Funktion ist, dass KiCad für Vorgänge wie das Platzieren von Text zwischen verschiedenen Rastern umschalten kann, während Symbole und Wires auf dem 50-mil-Raster verbleiben, um dem Pinabstand der Symbolbibliothek zu entsprechen. Dieses Maß an Flexibilität bei der Anwendung von Rastern ist entscheidend, um Präzision und Konsistenz in Schaltplänen zu gewährleisten. Es bedeutet, dass Sie die gewünschten Rastergrößen für verbundene Elemente, Drähte, Text und Grafiken festlegen können (**Bild 5**) und KiCad automatisch auf das entsprechende Raster umschalten kann, wenn eines dieser Elemente ausgewählt wird (so dass Sie dies nicht manuell tun müssen).
Ich kann gar nicht genug betonen, wie viel Zeit diese Funktion spart. Sie ermöglicht mir den nahtlosen Wechsel zwischen den Rastern, je nach den spezifischen Anforderungen meines Entwurfs, ohne dass ich das Raster in den *Preferences* jedes Mal manuell ändern muss. Sobald Sie Ihre bevorzugten Einstellungen in den Voreinstellungen festgelegt haben, können Sie einfach mit Ihrer Arbeit fortfahren und müssen sich nur noch selten Gedanken über die verwendete Rastergröße machen. Durch diese Automatisierung passt sich das Raster an das von Ihnen verwendete Werkzeug an, sei es beim Verdrahten, Zeichnen oder Schreiben von Text, und wählt die entsprechende Rastergröße.

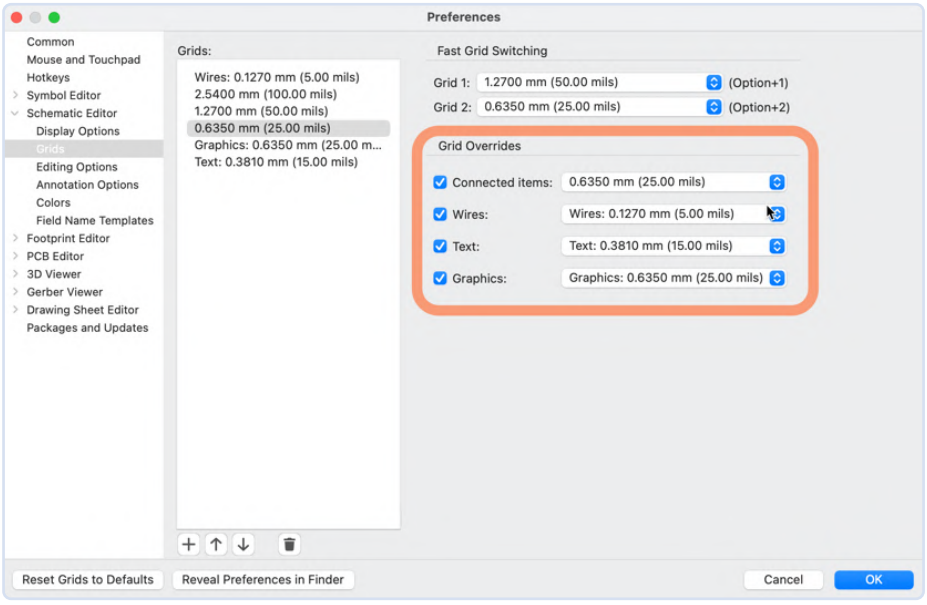


Bild 5. Das Einstellungsfenster Grid Overrides *in den Einstellungen des Schaltplaneditors.*

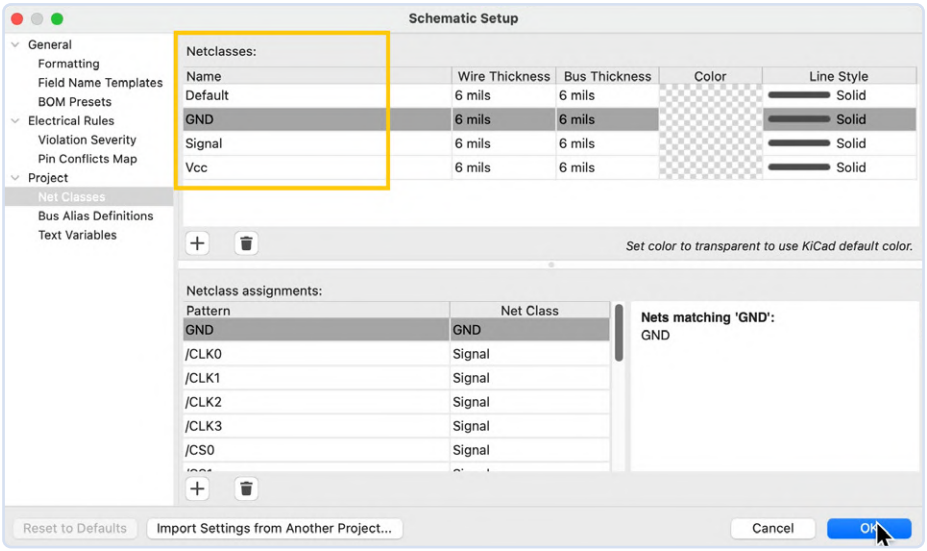


Bild 6. Netzklassen und ihre Netzzuweisungen sind jetzt im Schaltplan- und im PCB-Editor integriert. Hier sehen Sie die vorhandenen Netzklassen im Schaltplaneditor.

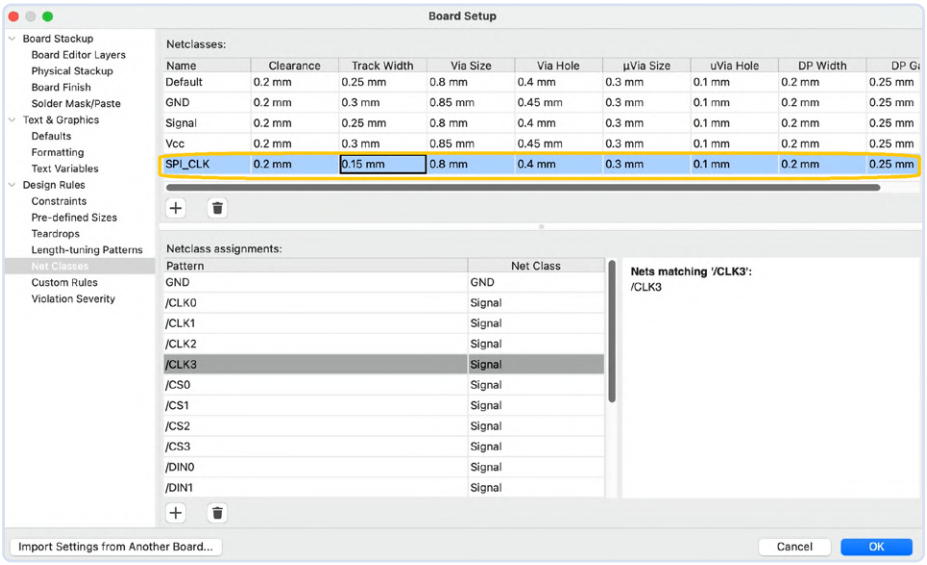


Bild 7. Erzeugen einer neuen Netzklasse im PCB-Editor.

Synchronisation von Netzklassenzuweisungen

In KiCad 8 wurde die Integration von Schaltplan und Platinenlayout durch die automatische Reflexion von Netzklassenzuweisungen (net class assignments) verbessert. Alle Netzklassenzuweisungen im Schaltplan werden nun nahtlos in das Platinenlayout übernommen und sind in der Umgebung des PCB-Editors sichtbar. Der PCB-Editor spiegelt diese Änderungen automatisch wider, wenn Sie Netzklassen im Schaltplan erstellen oder ändern. Wenn Sie zum Beispiel eine Netzklasse für Hochgeschwindigkeitssignale im Schaltplan definiert haben, werden diese Signale gruppiert und die entsprechenden Designregeln im Platinenlayout berücksichtigt.

Diese neue Funktion vereinfacht den Designprozess und sorgt dafür, dass die Netzklassen im Schaltplan und im Layout konsistent sind, wodurch die Gefahr von Fehlern und Fehlanpassungen verringert wird. Außerdem spart es Zeit, da die Netzklassenzuweisungen im Schaltplan und im Layout nicht mehr manuell wiederholt werden müssen.

Betrachten wir dazu ein praktisches Beispiel, wiederum aus der vierten Auflage des Buches *Kicad Like A Pro*. In einem der Projekte sind die Netzklassen im Schaltplaneditor wie in **Bild 6** eingestellt. Als ich die Arbeit im PCB-Editor fortsetzte, beschloss ich, eine neue Netzklasse für den SPI-Takt hinzuzufügen. Noch im PCB-Editor erstellte ich diese Netzklasse auf dem Tab *Board Setup Net Classes* wie in **Bild 7**.

In früheren KiCad-Versionen war die neue Netzklasse *SPI_CLK* dann im Schaltplan-Editor nicht verfügbar, weil Schaltplan und Platine nicht synchroniert waren. In KiCad 8 jedoch synchronisiert die verbesserte Integration die Netzklassen automatisch. Um dies zu verifizieren, können Sie sehen, dass die neue Netzklasse im Schaltplaneditor vorhanden ist (**Bild 8**).

Die automatische Netzklassenzuweisung in KiCad 8 verbessert den Entwurfsprozess erheblich. Diese neue Funktion reduziert den manuellen Aufwand und das Potenzial für Fehler, genau wie Sie es bei der Funktion zum Überschreiben der Rastergröße gesehen haben. Wir können uns deshalb mehr auf die Optimierung der Entwürfe konzentrieren als auf Verwaltungsaufgaben.

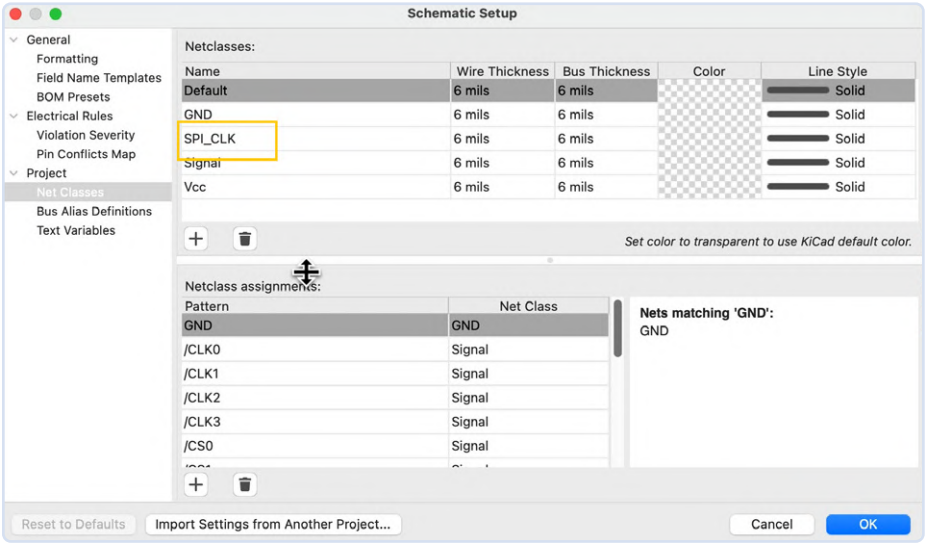


Bild 8. Die neue Netzklasse wurde im Schaltplaneditor synchronisiert.

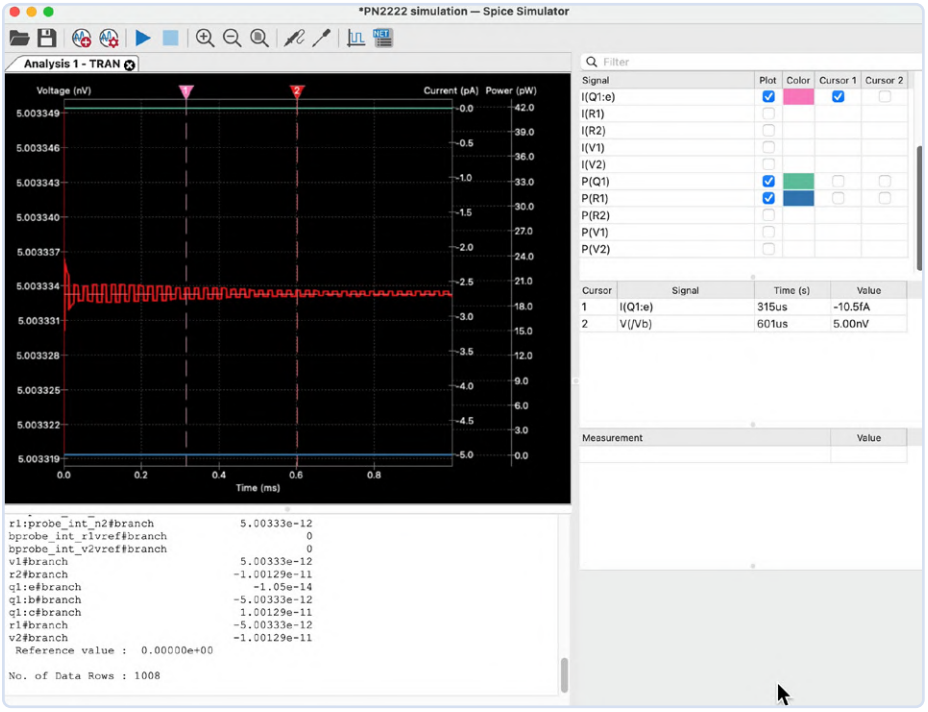


Bild 9. Ein Diagramm mit Transienten-Simulation im aktualisierten KiCad-Schaltungssimulator.

Der Simulator

Eine der herausragenden Aktualisierungen in KiCad 8 ist die Verbesserung der eingebetteten SPICE-Simulationswerkzeuge, die von ngspice [3] unterstützt werden. Die Zusammenarbeit zwischen den Entwicklern von KiCad und ngspice hat zur Beseitigung von Fehlern und zu mehreren neuen Funktionen geführt, die die Schaltungssimulation für die Benutzer leistungsfähiger und praktischer machen.

Ngspice, ein Mixed-Level/Mixed-Signal-Simulator für elektronische Schaltungen, wird häufig für die Simulation analoger und digitaler Schaltungen verwendet. Er liefert detaillierte Analysen der Funktionalität einer Schaltung, was für die Verifizierung und Optimierung eines Entwurfs von entscheidender Bedeutung ist. Durch die Integration von ngspice in KiCad können User Schaltpläne mit SPICE-Direktiven versehen, Schaltungen simulieren und die Ergebnisse analysieren, ohne die KiCad-Umgebung zu verlassen. Diese nahtlose Integration rationalisiert den Entwicklungsprozess und verbessert die Effizienz.

KiCad 8 führt eine überarbeitete Benutzeroberfläche für den Simulator ein. Eine der interessantesten neuen Funktionen ist die Möglichkeit, Plots von mehreren Signalen gleichzeitig zu verwalten. Darüber hinaus unterstützt der Simulator jetzt nicht nur die Darstellung von Spannung und Strom, sondern auch von Leistungsinformationen, wodurch ein vollständiges Bild der Stromaufnahme einer Schaltung entsteht. Diese Neuerungen machen den Simulator zu einem noch leistungsfähigeren Schaltungsentwurfs- und -analysewerkzeug und verbessern die Benutzer-

freundlichkeit erheblich. **Bild 9** zeigt das Ergebnis einer Transienten-Simulation (TRAN). Die Darstellung zeigt mehrere Werte, einschließlich Spannung, Strom und Leistung über die Zeit.
KiCad 8 bietet vier neue Simulationstypen: Pol-Nullstellen, Rauschen, S-Parameter und FFT. Diese Erweiterung ermöglicht eine umfassendere und genauere Analyse von elektronischen Schaltungen. User können Signale definieren und Diagramme für Ausdrücke wie `V(/in)` und `V(/out)` hinzufügen, um eine breitere Palette von Simulationsergebnissen direkt in KiCad anzuzeigen.
Außerdem können die Ergebnisse der Arbeitspunkt-Simulation (OP) direkt auf dem Schaltplan sichtbar gemacht werden. Mit dieser Funktion gewinnen Anwender tiefere Einblicke in das Verhalten und die Leistung ihrer Schaltungen, was die Optimierung und Verfeinerung des Designs erleichtert. **Bild 10** zeigt die Ergebnisse der Arbeitspunkt-Simulation, die direkt im Schaltplaneditor in Form von roten Labels angezeigt werden. Ich fand diese verbesserten Simulationsfunktionen und ihre Integration zwischen dem Simulator und dem Editor sehr nützlich. Sie spiegeln den Anspruch von KiCad wider, seine Fähigkeiten kontinuierlich zu verbessern und weiterzuentwickeln, um die sich gesteigerten Bedürfnisse seiner Anwender zu erfüllen.

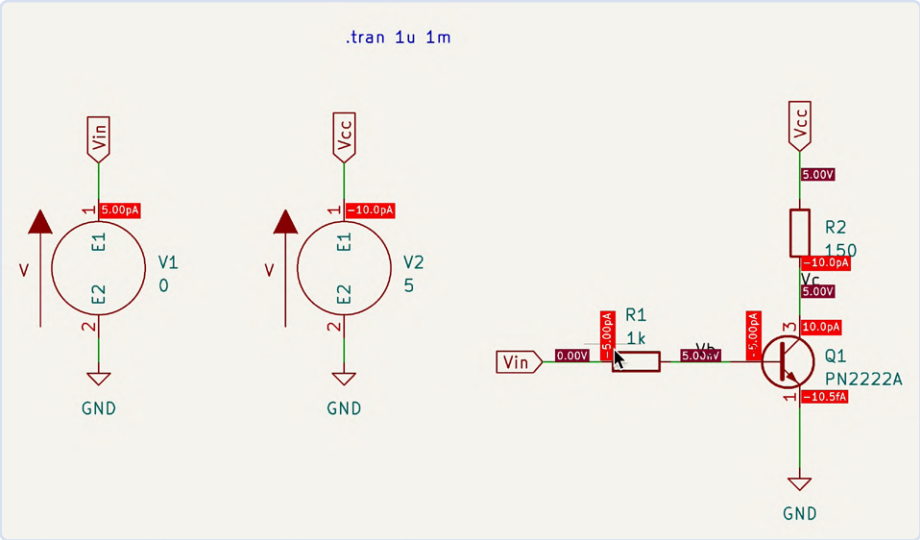


Bild 10. Eine neue Funktion in KiCad 8 ist die Übernahme der Simulator-Labels in den Schaltplaneditor.

Weitere Verbesserungen

Es gibt noch viele weitere kleine, aber wichtige Verbesserungen in KiCad 8, die ich zum Abschluss dieses Artikels zumindest kurz anreißen möchte:

- **Verbesserte Import- und Exportfunktionen**: KiCad 8 führt verbesserte Datenimport- und Exportwerkzeuge ein. Benutzer können nun Projekte aus verschiedenen Tools, einschließlich Solidworks und LTSpice, importieren und in Formaten wie IPC-2581 und STEP mit Kupfer-Shapes exportieren, um die Kompatibilität zu anderen Tools zu verbessern.
- **Aktualisierter Schaltplan- und Symboleditor**: Der Schaltplaneditor verfügt jetzt über neue Bedienfelder für Properties, Suche und Netznavigation, die die Navigation und die Effizienz der Bearbeitung verbessern. Der neuste BOM-Exporter ermöglicht eine In-App-Anpassung, während editierbare Leistungssymbole und Pin-Helper den Designprozess rationalisieren.
- **Verbesserungen des 3D-Viewers**: Der 3D-Viewer verfügt jetzt über eine aktualisierte Benutzeroberfläche mit einem Erscheinungsbild-Panel, Sichtbarkeitsvorgaben und Ansichtsfenstern, die die Prüfung und Bearbeitung von 3D-Modellen erleichtern.
- **Erweiterungen der Befehlszeilenschnittstelle (CLI)**: Die erweiterte Befehlszeilenschnittstelle in KiCad 8 unterstützt neue Funktionen wie DRC/ERC-Berichte in JSON, Stücklistenerstellung und den Export von glTF/VRML-Modellen und bietet fortgeschrittenen Benutzern mehr Kontrolle und Flexibilität.
- **Interaktive Längenabstimmung und benutzerdefinierte Form von Pads**: Die interaktiven Werkzeuge für die Längenabstimmung unterstützen jetzt veränderbare Muster, und die Benutzer können Thermal-Spoke-Pads (Wärmefallen) selber definieren, was für bestimmte Anwendungsfälle sehr nützlich sein kann.

Schon KiCad 7 ist ein ausgezeichnetes Werkzeug, aber diese Verbesserungen machen KiCad 8 zu einem noch robusteren und effizienteren Werkzeug für die Elektronikentwicklung für Anfänger und fortgeschrittene Benutzer!

RG – 240278-02

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Anmerkungen zu diesem Artikel? Dann wenden Sie sich bitte an die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.

Über den Autor

Dr. Peter Dalmaris ist Pädagoge, Elektronikingenieur, Elektronikbastler und Maker. Er erstellt Online-Videokurse über DIY-Elektronik und ist Autor mehrerer technischer Bücher, darunter die Reihen *KiCad Like a Pro*, KiCad 6 Fundamentals and Projects und deren aktualisierte Versionen. Sein Unternehmen Tech Explorations bietet eine Vielzahl von Bildungskursen und Bootcamps für Elektronikbastler, MINT-Studenten und -Lehrer an.

WEBLINKS

[1] Download KiCad 8: https://www.kicad.org/download/
[2] Peter Dalmaris, KiCad Like a Pro - 4. Auflage (Elektor, 2024)
Band 1: www.elektor.de/20928
Band 2: www.elektor.de/20930
[3] ngspice: https://ngspice.sourceforge.io/

SPECTRAN® V6 XPR

REAL-TIME SPECTRUM ANALYZER

Mastering **Microwave** Measurements

WR08
90 - 140 GHz

WR10
75 - 110 GHz

WR12
60 - 90 GHz

WR15
50 - 75 GHz

RTBW	Sweep Speed	ADC	DANL*
490 MHz	**3 THz/s**	**16-Bit**	**-170 dBm/Hz**

- **Weltneuheit:** USB Echtzeit 140 GHz Spektrumanalysator
- Analysieren Sie wichtige Standards wie **5G oder Radar**
- **Rekordverdächtige** 490 MHz USB Echtzeitbandbreite
- **24/7 Aufzeichnung** und Analyse von IQ-Daten
- **16-Bit 2 GSPS ADC**
- **Einzelner USB-C** Anschluss inkl. Strom
- **Windows und Linux** Software inkludiert
- Ultra-kompakter Formfaktor

*Abhängig von der Frequenz

MADE IN GERMANY

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

Aaronia AG
Aaroniaweg 1
D-54597 Strickscheid

AARONIA AG®
WWW.AARONIA.DE

Elektor @ electronica 2024

electronica Fast Forward 2024, Experten auf der Bühne, Influencer Foren, Live Elektor Lab Talk Shows und mehr

Vom Elektor-Team

Die electronica 2024 (12.-15. November) in München ist auf dem besten Weg, größer zu werden als je zuvor. Rund 2.800 Aussteller aus 50 Ländern werden in 18 Hallen ihre neuesten Produkte und Entwicklungen präsentieren. Natürlich ist auch Elektor mit einem eigenen Stand vertreten. In diesem Jahr kooperieren wir wieder mit der Messe München für den electronica Fast Forward Award. Außerdem stellen bekannte Elektronik Content-Creator wie GreatScott! ihre neuesten Projekte vor, wir interviewen Experten und es gibt täglich einen Live Lab Talk. Wir sehen uns in München!

Alle zwei Jahre verwandelt sich München in ein Mekka für Elektronikprofis und -enthusiasten. Auf der electronica 2024 (12.-15. November, Messe München) können Sie die neuesten Entwicklungen in den Bereichen KI, IoT, Smart Energy, GaN- und SiC-Halbleiter und vieles mehr sehen. Wenn Sie teilnehmen, laden wir Sie ein, Elektor am Stand B4.440 zu besuchen, wo unsere Teams zur Verfügung stehen, um die neuesten Technologien zu diskutieren, Einblicke in die Elektronikindustrie zu geben und Live-Interviews mit wichtigen Einflussnehmern und Experten zu führen. Wenn Sie ein Unternehmen führen, stellen wir Ihnen auch die Möglichkeit vor, wie Elektor und eeNews Europe Ihre Marketing- und Innovationsziele unterstützen können.

Egal, ob Sie ein Branchenprofi oder ein Technikenthusiast sind, besuchen Sie auf jeden Fall den **Stand B4.440**, um die innovativen Startups, Influencer und Experten aus nächster Nähe zu erleben. Dies ist Ihre Gelegenheit, Spitzentechnologie aus erster Hand zu sehen und mit den Menschen dahinter ins Gespräch zu kommen. Kommen Sie zu uns!

electronica Fast Forward 2024

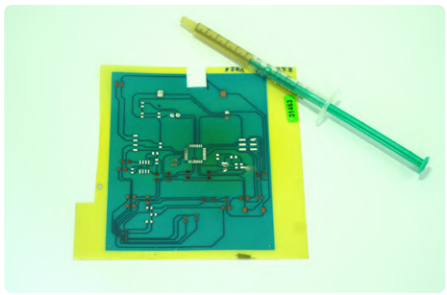
Auf der electronica Fast Forward 2024 stehen Startups im Mittelpunkt, um die Zukunft der Elektronik zu präsentieren. In dieser sechsten Ausgabe unseres Startup-Events, das von der electronica und Elektor organisiert wird, werden die Startups bahnbrechende Innovationen in den Bereichen IoT, Robotik, Batterieentwicklung und mehr vorstellen. Die fünf ausgewählten Startups auf der electronica Fast Forward beschäftigen sich mit einigen der wichtigsten Herausforderungen im Elektroniksektor. Wie immer ist die electronica Fast Forward nicht nur eine Präsentation, sondern auch ein Wettbewerb. Die Startups werden ihre Technologien vor Branchenführern und Entscheidern präsentieren und um ein Medienbudget von insgesamt 85.000 Euro wetteifern. Der Sieger erhält außerdem einen voll bezahlten Messestand auf der electronica 2026. Am Freitag findet die Zeremonie statt, bei der die drei Preisträger vorgestellt werden (siehe **Zeitplan**).

BTRY AG (Schweiz)

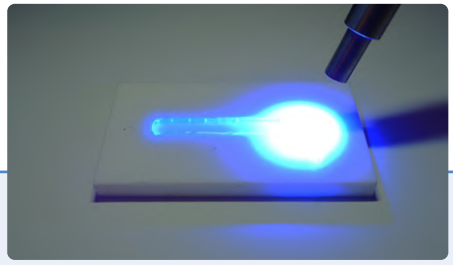
BTRY ist ein ETH-Spinoff, das die branchenweit erste energiedichte Festkörperbatterie entwickelt, die mit fortschrittlichen Halbleiterfertigungsmethoden hergestellt wird. Das Produkt ist eine fortschrittliche Lithium-Ionen-Batterie, die innerhalb einer Minute aufgeladen werden kann. Sie funktioniert bei sehr hohen und niedrigen Temperaturen und kann mehrere tausend Lade-/Entladezyklen überstehen.
www.btry.ch

BTRY

Nightjar Technologies (Indien)
Nightjar Technologies ist ein Spin-off von RESOLVE, einer in Washington DC ansässigen Umwelt-NGO. Ihr Vorzeigeprodukt, TrailGuard AI, ist ein KI-fähiges Kamerasystem zur Bekämpfung von Wilderei und zur Entschärfung von Konflikten zwischen Mensch und Tier in Entwicklungsländern.
www.nightjar.in



SpeedPox (Österreich)
SpeedPox bietet innovative und ultraschnell härtende Epoxidharze, leitfähige Klebstoffe und Tinten. Ihre Epoxide sind Einkomponentensysteme mit praktisch unbegrenzter Topfzeit bei Raumtemperatur. Bei Wärme- oder UV-Anregung wird ein patentierter Selbstaushärtungsmechanismus ausgelöst, der 99 % der Zeit und Energie spart. Anstatt mehrere Stunden in einem Industrieofen zu verbringen, ermöglicht SpeedPox eine Aushärtung innerhalb von Sekunden.
www.speedpox.com



ICECAP Systems (Malta)
Das Ziel von ICECAP Systems ist es, ein kompaktes Kühlsystem für die breite Anwendung in verschiedenen Produkten zu entwickeln. Durch den Einsatz von mehrstufigen thermoelektrischen Modulen (TEMs), neuartigen Montagetechniken und innovativen Optimierungsalgorithmen können niedrigere Temperaturen in kleineren Gehäusen erreicht werden, was eine einfache Integration in tragbare Geräte ermöglicht. Zu den Anwendungen gehören unter anderem Hochgeschwindigkeitskameras, Radioempfänger, Teleskope, medizinische Transporter, Laborgeräte und Hochleistungsprozessoren.
www.icecapsystems.com

Banyan.eco (Frankreich)
Banyan.eco hat sich zum Ziel gesetzt, der Welt der Elektronik zu helfen, eine Netto-Null zu erreichen, was bedeutet, dass die Gesamtmenge der erzeugten Treibhausgase durch die aus der Atmosphäre entfernte Menge ausgeglichen wird. Die vielschichtige Lieferkette und der industrielle Prozess in der Elektronikindustrie ist einer der komplexesten Industriezweige, so dass es äußerst schwierig ist, die Emissionen über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts zu messen, von der Wiege bis zum Grabe. Banyan.eco nutzt künstliche Intelligenz und digitale Öko-Zwillinge, um den Kohlenstoff-Fußabdruck von Produkten und Unternehmen im Elektronikbereich innerhalb von Minuten zu ermitteln.
www.banyan.eco

electronica Fast Forward 2024 Sponsoren

Wichtige Industriesponsoren, darunter **NXP**, **MikroE**, **Mouser** und **PCBWay**, unterstützen die Veranstaltung, um das Wachstum und die Zusammenarbeit in der Elektronikbranche zu fördern.

Elektor @ electronica: Zeitplan

Dienstag, 12. November

09:00 **Startup pitch: Banyan.eco** (B4.440)
10:00 **Startup pitch: BTRY AG** (B4.440)
10:30 **Krüger Consulting GmbH** (B4.440)
11:00 **Startup pitch: ICECAP Systems** (B4.440)
12:00 **Startup pitch: Nightjar Technologies** (B4.440)
13:00 **Startup pitch: SpeedPox** (B4.440)
14:00 **Interview: GreatScott!, LiPo Kit** (B4.440)
15:00 **Interview: Jean-Pierre Joosting, eeNews Europe** (B4.440)
17:00 **Elektor Lab Talk live** (B4.440)

Mittwoch, 13. November

09:00 **Startup pitch: SpeedPox** (B4.440)
10:00 **Startup pitch: Banyan.eco** (B4.440)
10:30 **NXP** (B4.440)
11:00 **Startup pitch: BTRY AG** (B4.440)
12:00 **Startup pitch: ICECAP Systems** (B4.440)
13:00 **Startup pitch: Nightjar Technologies** (B4.440)
14:00 **Interview: Max Imagination** (B4.440)
15:00 **Interview: Ungarisches Konsulat** (B4.440)
17:00 **Elektor Lab Talk live** (B4.440)

Donnerstag, 14. November

09:00 **Startup pitch: Nightjar Technologies** (B4.440)
10:00 **Startup pitch: SpeedPox** (B4.440)
11:00 **Startup pitch: Banyan.eco** (B4.440)
12:00 **Startup pitch: BTRY AG** (B4.440)
13:00 **Startup pitch: ICECAP Systems** (B4.440)
13:30 **Lavorro Inc.** (B4.440)
14:00 **Interview: Jorge Costa Dantas Faria, Europäischer Innovationsrat EISMEA** (B4.440)
15:00 **Interview: Peter Dalmaris, KiCad 8** (B4.440)
16:00 **B2B & Influencer Marketing** (B4.131, Visionary Stage)
17:00 **Elektor Lab Talk live** (B4.440)

Freitag, 15. November

10:00 **Interview: Nick Flaherty, eeNews Europe** (B4.440)
11:00 **Influencer Marketing für Studenten** (B4.131, Visionary Stage)
12:00 **electronica Fast Forward 2024 Preisverleihung** (B4.131, Visionary Stage)
13:00 **Lötwettbewerb mit DIY GUY Chris** (B4.440)

Einen Plan der Halle B4 finden Sie hier
https://exhibitors.electronica.de/ausstellerportal/2024/hallenplaene/hallenplan/?lid=b4

Dieser Zeitplan kann sich noch ändern.

Treffen Sie die Influencer: Engagement und Innovation fördern

Influencer spielen eine entscheidende Rolle bei der Überbrückung der Kluft zwischen innovativer Technologie und der allgemeinen Akzeptanz. Am Elektor-Stand stellen drei namhafte Influencer aus der Elektronikbranche ihre neuesten Projekte vor: GreatScott!, Max Imagination und DIY GUY Chris. Zusammen repräsentieren diese kreativen Innovatoren mehr als 2 Millionen Follower.

GreatScott! ist bekannt für seine ausführlichen Elektronik-Tutorials, die sowohl für Enthusiasten als auch für Profis geeignet sind. Seine beliebten DIY Projekte, wie zum Beispiel sein Tutorial für eine eigene Powerbank, haben unzählige Zuschauer dazu inspiriert, sich mit Elektronik zu beschäftigen.

www.youtube.com/@greatscottlab

Max Imagination bringt einen kreativen, künstlerischen Ansatz in seine Projekte ein und verbindet Technik mit Innovation. Auf seinem Kanal finden sich einzigartige Konstruktionen wie maßgeschneiderte Roboter und 3D-gedruckte Gadgets, die komplexe Ideen zugänglich machen.

www.youtube.com/@MaxImagination

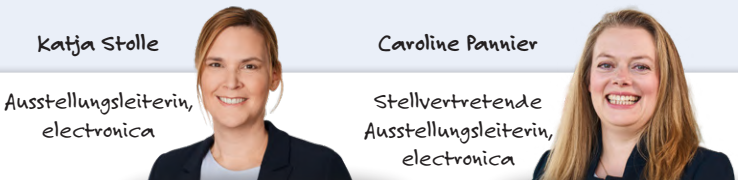
DIY GUY Chris vereinfacht fortschrittliche Elektronik durch Schritt-für-Schritt-Anleitungen zu Themen wie LED-Anzeigen und CNC-Maschinen und ermutigt Anfänger, sich neuen Herausforderungen zu stellen. Außerdem wird er auf unserer electronica Fast Forward Streaming Stage einen Lötwettbewerb veranstalten. Das solltet ihr nicht verpassen.

www.instagram.com/diyguychris

Die Teilnehmer können die Influencer am Elektor-Stand treffen, wo sie Live-Demonstrationen veranstalten, Fragerunden leiten und vieles mehr. Ihre Anwesenheit verleiht der Veranstaltung eine zusätzliche Dynamik und verstärkt die Reichweite und Wirkung der ausgestellten Innovationen.

Experten Live / Elektor Lab Talk

Jeden Nachmittag (Dienstag bis Donnerstag) werden Elektor-Redakteur Brian Tristam Williams und seine Kollegen am Elektor-Stand verschiedene Experten interviewen, wie z.B. Peter Dalmaris, der über die neueste Version von KiCad, der beliebten Open-Source ECAD-Softwarelösung, sprechen wird. Wenn Sie die electronica nicht persönlich besuchen können, können Sie unsere Interviews und Lab Talk Shows unter *www.youtube.com/@ElektorTV* verfolgen. Details finden Sie im obigen **Zeitplan**.



electronica: 60 Jahre und immer noch wachsend!

Die Zukunft der Elektronik durch Jahrzehnte der Innovation gestalten

Die electronica ist seit sechs Jahrzehnten eine treibende Kraft in der Elektronikbranche. Die Verantwortlichen der Veranstaltung erzählen die Geschichte ihres Aufstiegs und geben einen Einblick in die Zukunft der Elektronik, die auf der Veranstaltung 2024 zu sehen sein wird. In diesem Jahr feiert die Messe ihr 60-jähriges Bestehen und wird größer sein als je zuvor. Zum ersten Mal werden alle 18 Hallen der Münchner Messe genutzt. In diesem kurzen Interview sprechen Katja Stolle (Ausstellungsleiterin electronica) und Caroline Pannier (Stellvertretende Ausstellungsleiterin electronica) über 60 Jahre electronica und darüber hinaus.

Elektor: Was war die Mission der electronica, als sie vor 60 Jahren ins Leben gerufen wurde? Hat sich der zentrale Auftrag seither verändert?
Katja Stolle: Während die Kernaufgabe der electronica - die Präsentation von Innovationen und die Förderung der Zusammenarbeit mit der Industrie - in den letzten 60 Jahren gleich geblieben ist, hat sich ihr Fokus deutlich erweitert. Im Jahr 1964 startete die Veranstaltung als erste Messe in Deutschland, die sich ausschließlich elektronischen Komponenten widmete, während sie bereits einen internationalen Fokus hatte. In den folgenden Jahren wuchs die electronica stetig und wurde schnell zum wichtigsten Treffpunkt der internationalen Elektronikindustrie. Heute bieten wir eine Plattform, um das gesamte Spektrum an Technologien, Produkten und Lösungen aus der gesamten Elektronikindustrie zu präsentieren, Menschen aus aller Welt zu vernetzen, die neuesten Trends aufzuzeigen und so Innovation und Wachstum in der Branche zu fördern.

Elektor: Zahlreiche technologische Meilensteine wurden erstmals auf der electronica vorgestellt. Welche Innovationen haben die Branche und die Welt am nachhaltigsten beeinflusst?
Caroline Pannier: Die electronica war in den vergangenen Jahrzehnten Schauplatz einer Reihe von technologischen Meilensteinen. Dazu gehören zum Beispiel die Einführung von Mikroprozessoren in den 1970er Jahren, die Entwicklung der mobilen Kommunikation in den 1980er und 1990er Jahren und die rasanten Fortschritte in der Digitalisierung in den 2000er Jahren mit der Verbreitung des drahtlosen Internets. Diese Innovationen haben die Welt nachhaltig verändert, indem sie die Elektronik kleiner, schneller und effizienter gemacht und ganz neue Branchen wie IoT, autonome Fahrzeuge und Smart Cities ermöglicht haben. Diese Durchbrüche prägen weiterhin die Zukunft der Technologie in praktisch jedem Sektor.

Elektor: Welche aufstrebenden Technologien werden Ihrer Meinung nach in den nächsten Jahren die electronica dominieren, wenn wir den technologischen Fortschritt betrachten?
Katja Stolle: Auch in den kommenden Jahren wird die electronica eine globale Bühne für die neuesten Innovationen sein, die die Elektronikindustrie voranbringen. Dazu gehören mehrere Technologien, die wahrscheinlich auch bei zukünftigen Ausgaben der electronica eine dominierende Rolle spielen werden, wie künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen oder nachhaltige Elektronik mit einem breiten Fokus auf Energieeffizienz, Wiederverwertbarkeit und Abfallreduzierung.

Elektor: Anlässlich ihres Jubiläums wird die Messe in diesem Jahr das Thema einer rein elektrischen Gesellschaft in den Mittelpunkt stellen. Erzählen Sie uns mehr über die Entscheidung, dieses Thema in den Mittelpunkt zu stellen, und darüber, was die Besucher auf der Veranstaltung vom 12. bis 15. November 2024 erwarten können.
Caroline Pannier: Die All Electric Society (AES) beschreibt eine Zukunftsvision, in der der gesamte Energiebedarf durch CO_2-neutralen Strom gedeckt wird. Es ist ein Konzept, das den Klimawandel bekämpfen und gleichzeitig die Energieversorgung sichern soll. Wir haben es in enger Zusammenarbeit mit der Industrie als Motto für die diesjährige electronica gewählt. Die AES und Nachhaltigkeit werden sich wie ein roter Faden durch die Ausstellung und das Rahmenprogramm ziehen. Neben der Präsentation nachhaltiger Technologien an den Ständen gibt es verschiedene Vorträge und eine Reihe von Sonderveranstaltungen zu diesem Thema. So zum Beispiel ein ganztägiges Vortragsprogramm und Podiumsdiskussionen des Green Leaders Network oder eine vom Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) unterstützte individuelle Tour, bei der die Besucher den Beitrag ausgewählter Aussteller zur AES live an ihren Ständen erleben können.

Zwei Live-Influencer-Foren

Auf der electronica 2024 in Halle B4.131 moderiert Elektor zwei informative Foren: eine Diskussion über smartes Influencer Marketing (Donnerstag, 14. November) und eine Diskussion für Studenten über den Weg zum Elektronik-Influencer (Freitag, 15. November). Das erste Forum, "The Future is Now: How to Incorporate Smart Influencer Marketing for Your Company" (Wie Sie intelligentes Influencer Marketing für Ihr Unternehmen einsetzen können) wird eine Diskussion mit Influencern stattfinden, die zusammen mehr als 2 Millionen Follower haben, und sich auf die Macht des Influencer Marketings in der Elektronikbranche konzentrieren. Das zweite Forum, "The Future is Now: How to Become an Influencer in Electronics" (Wie wird man Influencer in der Elektronik) richtet sich an Studenten und junge Ingenieure und bietet ihnen Einblicke in den Aufbau einer Karriere als Influencer im Bereich der Elektronikindustrie. Beide Veranstaltungen werden von einer professionell moderierten Podiumsdiskussion begleitet.

240566-02

MultiCalculator-Kit

Ein Elektronikrechner-Bausatz von Elektor mit Arduino

Von Ruud van der Meer (Niederlande)

Der MultiCalculator von Elektor ist mehr als nur ein Taschenrechner. Er berechnet binäre, hexadezimale und dezimale Werte, misst Licht, Temperatur und Temperaturdifferenz, dekodiert NEC-IR-Fernbedienungscodes, kennt sich aus mit Widerstandsfarben, berechnet kapazitive und induktive Reaktanz und vieles mehr. Und das Beste ist, dass der Bausatz sowohl elektronische als auch mechanische Teile enthält, mit Schrauben, Tastenkappen, Gehäuse und allem, was dazugehört.

Das Titelfoto beweist, dass der fertige Taschenrechner keineswegs wie ein zusammengebasteltes Projekt aussieht. Er zeigt sich mit speziell entworfenen, farbigen Tastenkappen und einem zweizeiligen LCD. In den Übersichten der **Eigenschaften** und der **Spezifikationen** sehen Sie dann auch, dass der MultiCalculator nicht nur hübsch aussieht, sondern auch einiges drauf hat.

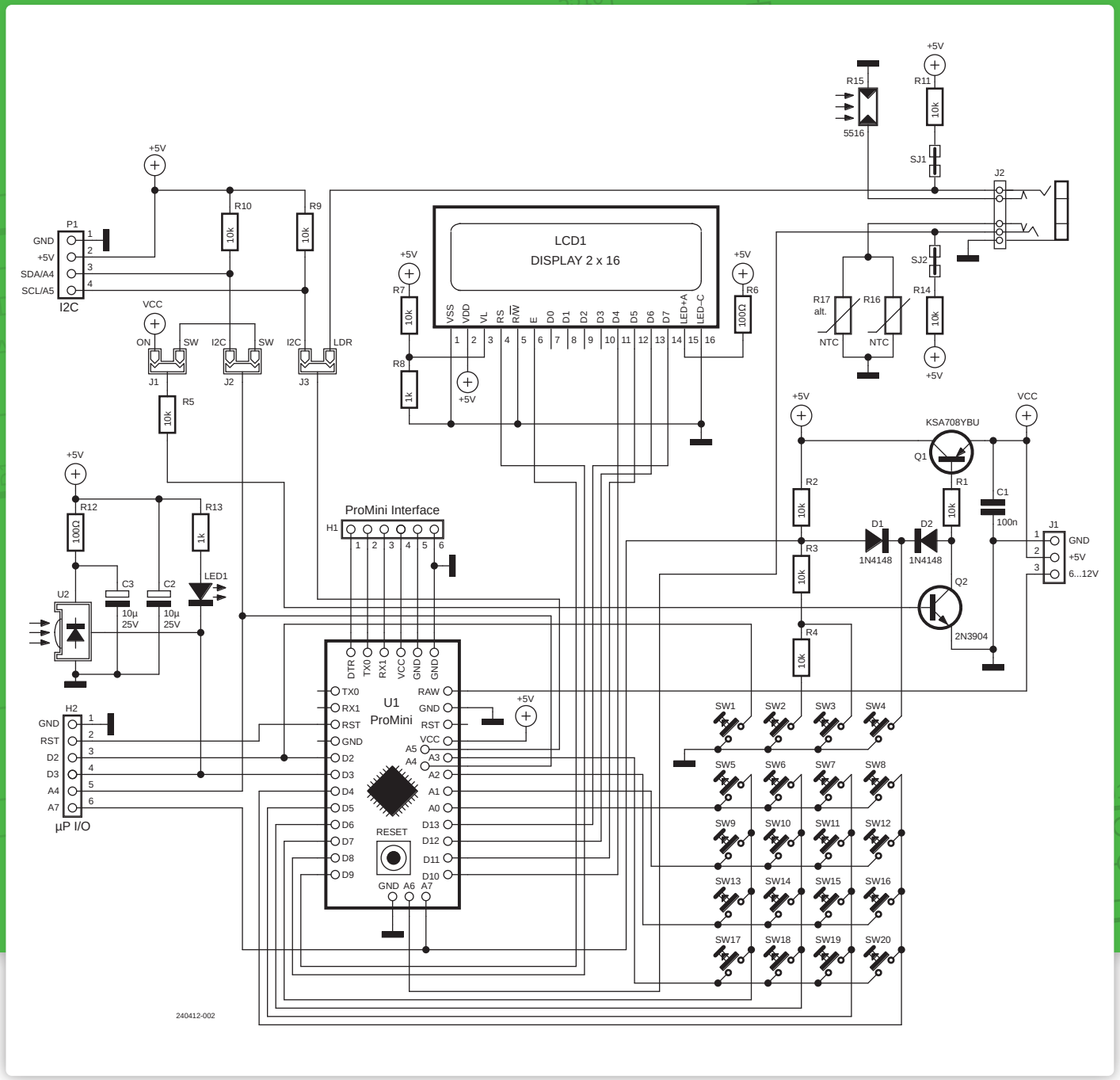
Generell

Der MultiCalculator ist auf einem Arduino-Modul Pro Mini aufgebaut, das auch nach der Fertigstellung des Projekts über eine sechspolige Buchsenleiste auf der Gehäuserückseite umprogrammiert werden kann. Der MultiCalculator wird über USB-C mit 5 V versorgt und verbraucht nur etwa 30 mA. Er kann in der Standard-Arduino-IDE durch benutzerdefinierte Software auch für andere Funktionen programmiert werden.

Bild 1 zeigt die verblüffend einfache, aber effektive Schaltung. Die seriellen Anschlüsse des Arduino werden für Überwachungs- oder andere Funktionen freigehalten und auf zwei (nicht verwendete/bestückte) Verbinder gelegt.

Eigenschaften

- Dezimale Fließkommaberechnung
- Binäre, hexadezimale, dezimale Berechnung
- ASCII-Zeichenanzeige
- Temperatur- und Delta-T-Messung
- Stoppuhr mit Rundenzeit
- Widerstandswertdekoder
- Berechnung des kapazitiven (Xc) und induktiven Blindwiderstands (Xl)
- Äquivalentwiderstandsberechnung: parallel, seriell und ergänzend
- Lichtmessung in mV und Lux
- Positionen-Zähler
- IR-Decoder für NEC-Codes
- AWG mit Maximalstromberechnung
- Würfel mit Rollsimulation
- Anpassung der Rechneroberfläche
- Kalibrierung der Temperaturmessung (Nullpunktkorrektur)
- Zweizeiliges LCD (blau mit weißer Schrift)

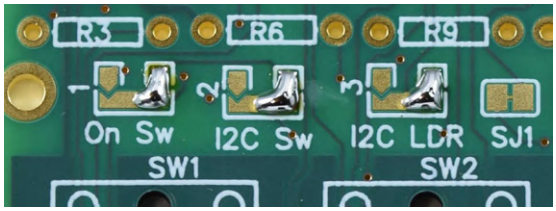


▲ *Bild 1. Die Schaltung des MultiCalculators ist unkompliziert, aber wirkungsvoll. Die Komplexität ist in der Software versteckt.*

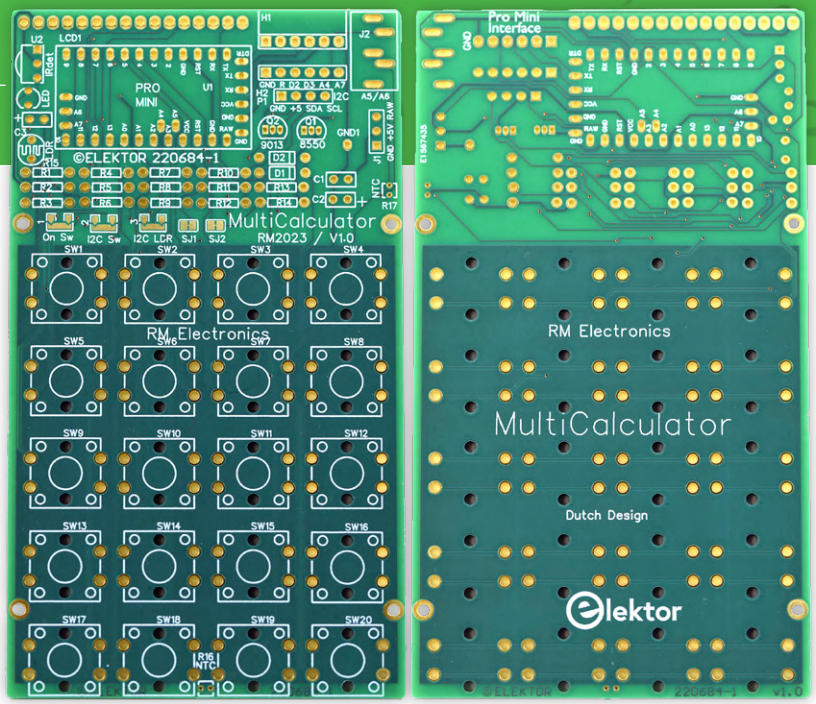
Spezifikationen

- Versorgungsspannung: 5 V (USB-C)
- Versorgungsstrom: 28...32 mA
- Arduino Pro Mini (ATmega328P bei 16 MHz)
- Arduino-IDE-programmierbar
- 2×16 alphanumerisches LCD (LCD 1602, blau mit weißer Schrift)
- 20 beschriftete Drucktasten
- 3,5 mm Klinkenbuchse für externe Sensoren
- Messbereich der wasserdichten Sensoren -40 bis +85 °C
- Abmessungen: 92×138×40 mm

Verbinder H2 führt GND, Reset, D2, D3, A4, A7, Verbinder P1 den I²C-Bus samt Spannungsversorgung. Um den I²C-Bus zu nutzen, müssen zwei doppelte Lötbrücken (**Bild 2**) verbunden werden. Die Aktivierung von I²C erfolgt über die Doppellötbrücke J2 (I2C/SW für SDA=A4), auf der Platine neben R6 und die Doppellötbrücke J3 (I2C/LDR für SCL=A5) neben R9. Bei jeder Doppellötbrücke darf nur eine Verbindung gelötet werden!



◀ *Bild 2. Die Lötbrücken am Platinenrand.*



▲

Bild 3. Oberseite (links) und Unterseite (rechts) der Platine.

Das Modul Arduino Pro Mini stellt weitere I/O-Ports zur Verfügung. Die I/O-Ports A5 und A6 sind auf die 3,5-mm-Klinkenbuchse J2 gelegt und über eine Leiterbahn zu den Lötbrücken SJ1 und SJ2 mit den 10-kΩ-Pull-ups R11 beziehungsweise R14 verbunden. Diese I/O-Anschlüsse können für Temperaturmessungen oder andere Anwendungen verwendet werden (je nach Software). Um die Verbindungen zu diesen Pull-up-Widerständen zu trennen, müssen Sie die kleine Leiterbahn zwischen den Pads von SJ1 und SJ2 entfernen. Und wenn die Verbindung wiederhergestellt werden soll, kann man eine Lötbrücke legen oder ein kleines Drahtstückchen zwischen die benachbarten Pads löten. Die Sensoren sind an A5 (LDR R15) und A6 (NTC R16 oder R17) gegen Masse angeschlossen. Wenn ein Stecker mit einem externen LDR und/oder NTC in J2 gesteckt wird, werden durch die Buchsenkontakte die internen Sensoren abgeschaltet.

Auf der Platine (**Bild 3**) kann ein NTC als R16 oder R17 an zwei Stellen platziert werden. Beide NTC-Pads sind parallel geschaltet und nutzen die gleichen Controller-Anschlüsse. Es muss aber nur ein NTC bestückt werden, und zwar vorzugsweise R16, da dieser Anschluss am weitesten vom „wärmespendenden" Arduino-Modul entfernt ist.

Bild 4. Die wasserdichten Temperatursensoren im Bausatz (links) und an einen 3,5-mm-Klinkenstecker angeschlossen (rechts).

▼

U2 ist ein IR-Decoder, dessen Signale über den Eingang D3 des Pro Mini erfasst werden. Die LED1 am Ausgang des Decoders leuchtet, wenn IR-Signale empfangen werden.

Ein Analogeingang A7 wird zum Auslesen der Taster SW2, SW3 und SW4 verwendet, die je nachdem die in Reihe geschalteten Widerstände R2 (über D1), R3 und R4 ändern und damit eine analoge Spannung erzeugen. SW5...SW20 sind in einer Matrix verbunden. Mit SW1 am I/O-Pin D2 kann man den Modus des MultiCalculators ändern. Ein kurzer Druck schaltet in den nächsten Modus, ein längerer Druck zurück in den vorherigen Modus.

Mit SW4 lässt sich der MultiCalculator per Software ein- oder ausschalten, abhängig von der doppelten Lötbrücke J1 neben R3 (ON/SW). Ist die Lötbrücke auf ON gestellt, wird der MultiCalculator automatisch mit Strom versorgt, sobald 5 V anliegen. Auf SW wird das Gerät erst durch einen Druck auf SW4 eingeschaltet, der die Basis des PNP-Transistors Q1 über R1 und D2 auf Masse legt. Dann wird die Stromversorgung eingeschaltet und das Modul startet. Der Druck auf SW4 muss lang genug sein, dass der Controller seinen I/O-Anschluss A4 auf High schaltet und über R5 und den NPN-Transistor Q2 den PNP-Transistor Q1 aktiviert.

Der Rechner kann auch mit einer Spannung von 6...12 V über den RAW-Anschluss J1 versorgt werden. Dazu kann ein kleiner 5-V-Regler auf dem Pro-Mini-Modul genutzt werden. Das Gerät wird durch Drücken der Taste ON/AC (SW4) eingeschaltet, bis ein Text auf dem Display erscheint. Zum Ausschalten drücken Sie die ON-Taste länger als 4 s, und wenn die Taste dann losgelassen wird, ist der MultiCalculator ausgeschaltet.

Ursprünglich verwendete der Autor für den PNP-Transistor Q1 einen SS8550 und für den NPN-Transistor Q2 einen 2SC9013 (wie auf der Platine angegeben). Da diese Typen aber nur schlecht bis gar nicht erhältlich sind, wurden sie vom Elektor-Labor durch die Typen KSA708YBU und 2N3904 ersetzt. Der genaue Typ ist aber nicht entscheidend, aber wenn ein Austausch notwendig ist, achten Sie auf die Pinbelegung der Transistoren. Bei den beliebten BC547 oder BC337 sind die Pins anders angeordnet!

Die Programmierung des Arduino Pro Mini kann über einen USB-C-zu-TTL-Konverter (der dem Bausatz beiliegt) über H1 erfolgen. Vergewissern Sie sich, dass der Jumper auf dem Programmieradapter auf die 5-V-Position gesteckt ist!

Das maßgefertigte Gehäuse besteht aus insgesamt elf transparenten Acrylplatten. Die oberen Platten sind dunkelbraun und transparent, der Rest ist klar. Für diesen Bausatz kann das ausführliche „Bau- und Benutzerhandbuch" kostenlos heruntergeladen werden - den Link finden Sie unter **Passendes Produkt**. Die Software und die erforderlichen Bibliotheken können von der Webseite

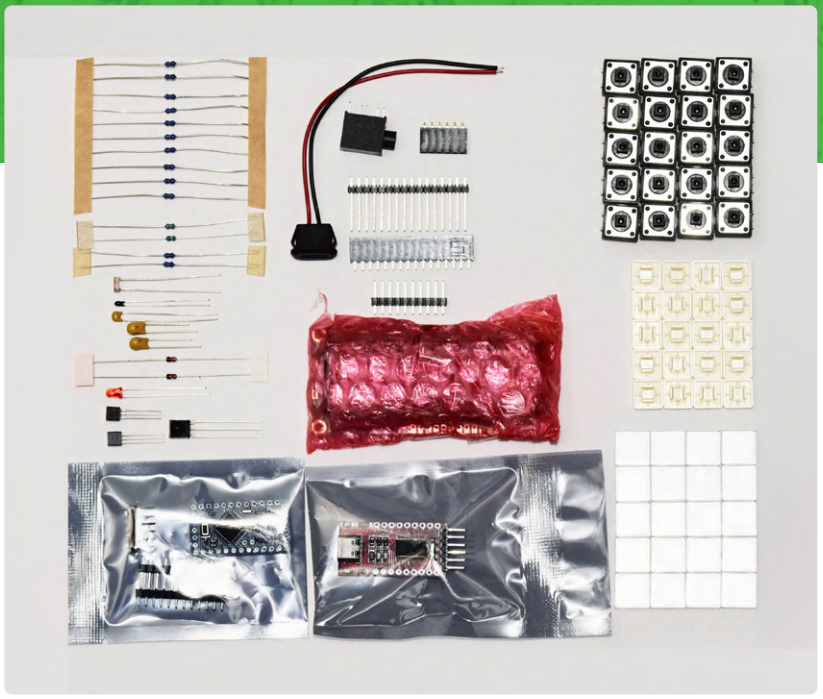


Bild 5. Inhalt des Elektor-MultiCalculator-Bausatzes (ohne Gehäuse und Schrauben).

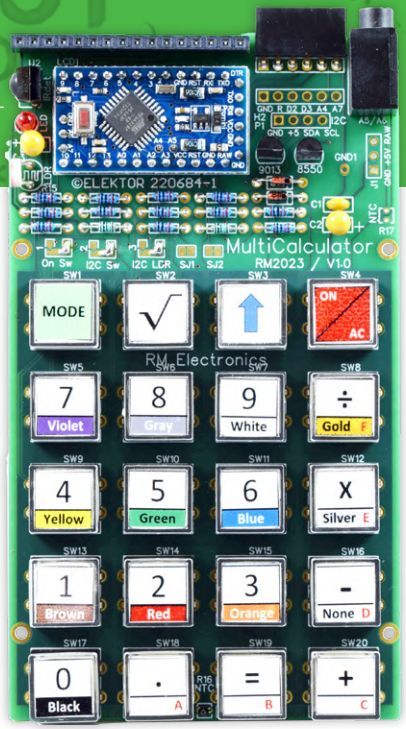


Bild 6. Die vollständig bestückte Platine, noch ohne LCD.

dieses Artikels [1] heruntergeladen werden. Zukünftige Versionen sind stets auf der Elektor-Labs-Projektseite unter [2] verfügbar.

Der letzte Schliff dieses Projekts wurde von Entwicklerlegende Ton Giesberts von Elektor vorgenommen, der die Dateien von Ruud im Altium Designer korrigierte. Außerdem wurden einige Bauteile durch besser erhältliche Versionen ersetzt und kleine sprachliche Feinheiten im Code bezüglich der Benutzeroberfläche korrigiert. Außerdem wurde Unterstützung bei der Entwicklung des Gehäuses geleistet, die Grundfunktionen blieben aber unangetastet.

Differenz-Temperaturmessung

Eine Betriebsart ist im Benutzerhandbuch nicht vollständig erklärt. Um den Modus der Differenz-Temperaturmessung zu verwenden, müssen die Kabel der beiden wasserdichten Sensoren im Bausatz (**Bild 4**) an einen 3,5-mm-Stecker (ebenfalls im Bausatz) angelötet werden. Der Stecker kann dann in die 3,5-mm-Buchse auf der Rückseite des MultiCalculators eingesteckt werden.

Schneiden Sie dazu die Stecker von den Kabeln der wasserdichten Sensoren ab :-(. Jeder Sensor wird mit einer Ader an die Massefahne des 3,5-mm-Steckers gelötet und die jeweils andere Ader an einen der anderen, kürzeren Lötfahnen. Es ist am besten, die Massekabel einige Millimeter kürzer zu schneiden, so dass die beiden anderen Adern etwas länger sind und verlötet werden können, ohne die Fahnen zu verbiegen. Zugegeben, es ist eine Friemelei und es empfiehlt sich, einen „etwas besseren" Klinkenstecker zu verwenden, eventuell einen gewinkelten. Der Stecker im Bausatz kann sich von dem auf dem Foto gezeigten unterscheiden. Messungen mit den wasserdichten Sensoren brauchen Zeit, bis sie die korrekte Temperatur zeigen, da sich die NTCs in mit Epoxy gefüllten 5×25 mm großen runden Metallröhrchen befinden.

Bild 7. Seitenansicht des bestückten MultiCalculators.

Montage und Eindrücke

Bild 5 zeigt, was man erhält, wenn man die Verpackung des Multicalculator-Bausatzes öffnet. Die Gehäuseteile und die Schrauben sind hier nicht zu sehen, aber im Lieferumfang enthalten. Nach dem Bestücken der Platine sollte sie (ohne Display) wie **Bild 6** aussehen. Die beiden Fotos von **Bild 7** und **Bild 8** zeigen die Seiten- und Rückansicht des MultiCalculators.

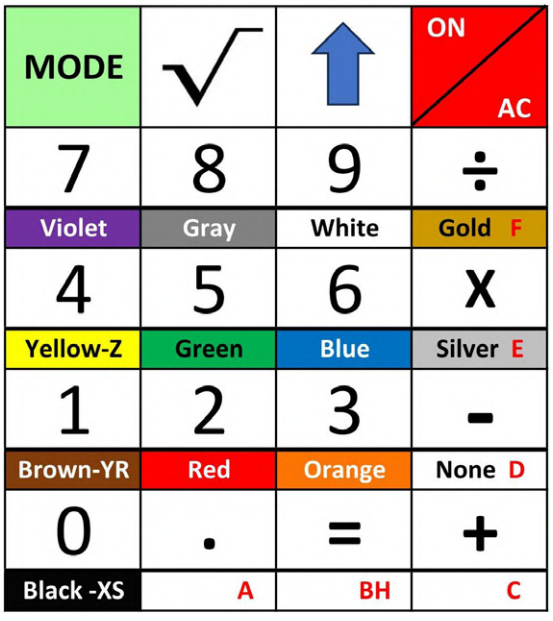
Bild 8. Rückansicht des bestückten MultiCalculators.

▲ *Bild 9. Die 22 Betriebsarten im Display.*

In **Bild 9** sind alle Screens für die 22 Modi der Software in Version 1.1 dargestellt. Sie entsprechen der Liste der **Betriebsmodi**. Die Modi können in zukünftigen Softwareversionen geändert oder erweitert werden. Die Bauanleitung aus [1] ist wesentlich ausführlicher als dieser Artikel, da ein herunterladbares PDF - Fluch oder Segen - keine Begrenzung der Seitenzahl hat.

Update: Eine neue Version der Software ist soeben erschienen. Es gibt zwei Änderungen: Die Funktion 18 ist jetzt effizienter, da sie nicht mehr eine Tabelle verwendet, sondern die Werte berechnet. Eine neue Funktion 4 wurde hinzugefügt, die nach EIA96 SMD-Widerstände dekodiert (diesmal mit einer Tabelle). Die neue Firmware, Version 1.2, benötigt ein neues Tastaturlayout (**Bild 10**), das als druckbares Bild im Archiv enthalten ist und von [2] heruntergeladen werden kann.

SE – 240412-02



▶ *Bild 10. Die neuen Tastensymbole der Firmware v1.2.*

Über den Autor

Ruud van der Meer (RM electronics) ist Elektronikingenieur, Software- und Hardwareentwickler sowie Lehrer und hat mehr als 40 Jahre in einem großen multinationalen Elektronikunternehmen gearbeitet. Als er erkannte, dass nicht jeder in der Lage war, neue Technologien ohne zusätzliche Anleitung zu nutzen, begann er, sowohl im Unternehmen als auch an einer Schule für technische Ausbildung in den Bereichen Elektrik, Elektronik, Digitaltechnik, Kommunikationstechnik und Mechatronik zu unterrichten. Privat nutzt er Computersysteme für die Hausautomatisierung.

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Anmerkungen zu diesem Artikel? Dann wenden Sie sich bitte per E-Mail an den Autor unter meergjm@gmail.com oder an die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.

Betriebsmodi (Software v1.1)

1. Taschenrechner
2. 4-Ring-Widerstandscode
3. 5-Ring-Widerstandscode
4. Umwandlung von dezimal in hexadezimal und in ASCII-Zeichen
5. Umwandlung von hexadezimal in dezimal und in ASCII-Zeichen
6. Umwandlung von Dezimal in Binär und in ASCII-Zeichen
7. Konvertierung von binär nach dezimal und nach hexadezimal
8. Berechnung von Hz, nF und XC (kapazitiver Blindwiderstand)
9. Berechnung von Hz, µH und Xl (induktiver Blindwiderstand)
10. Berechnung des Widerstands von zwei parallel geschalteten Widerständen
11. Berechnung des Widerstands von zwei in Reihe geschalteten Widerständen
12. Berechnung eines unbekannten Parallelwiderstandes
13. Messung der Temperatur
14. Differenz-Temperaturmessung T1, T2 und Delta (δ)
15. Messung der Lichtintensität
16. Stoppuhr mit Rundentimer-Funktion
17. Gegenstandszähler
18. Anzeige des Infrarot-NEC-Codes einer Fernbedienung
19. AWG (American Wire Gauge) und maximale Stromstärke
20. Würfeln
21. Personalisierung der Startnachricht
22. Temperaturmessung-Kalibrierung

Stückliste

Widerstände:
R1...R5,R7,R9...R11,R14 = 10 k, 1%
R6,R12 = 100 Ω, 1%
R8,R13 = 1 k, 1%
R15 = LDR GL5516, (5,4 × 4,4 mm, Raster 3,4 mm)
R16 = NTC 10 kΩ, Typ 3950, 5%
R17 = nicht bestückt

Kondensatoren:
C1 = 100 n / 50 V, 10%, X7R, Raster 2,54 mm
C2,C3 = 10 µ/25 V, 10%, Tantal, Raster 2,54 mm

Halbleiter:
D1,D2 = 1N4148, DO-35
LED = LED rot, 3 mm
Q1 = KSA708YBU, TO-92*
Q2 = 2N3904, TO-92*
U1 = Arduino Pro Mini 328 (ATmega328P, 5 V, 16 MHz)
U2 = TSOP14438 IR-Detektor
LCD1 = Alphanumerisches LCD-Modul, Typ 1602, 36×80 mm

Außerdem:
J1 = USB-C Buchse für Gehäusemontage, verdrahtet (nur 5 V und Masse), 9 mm × 16 mm
J2 = 3,5-mm-Klinkenbuchse für Platinenmontage, PJ-325M (5-polig mit 2 Schaltkontakten)
H1 = 1×6-polige Buchsenleiste, gewinkelt, Raster 2,54
H2 = nicht bestückt*
P1 = nicht bestückt
SW1...SW20 = Taster, 12×12×7,3 mm
20 Tasten-Oberteile mit Klarsicht-Kappen (11,8 mmØ)
1×16-polige Stiftleiste, Höhe 18,54 mm, vertikal, RM2,54, für LCD
1×16-polige Buchsenleiste, vertikal, RM2,54, für LCD
FT232-Adapter (USB-C nach TTL mit drei Pins zur Auswahl 3,3 V/5 V)
U1 = Stiftleisten, vertikal, RM2,54, für Arduino Pro Mini
2× NTC, 10 kΩ, wasserdichter Temperatur-Sensor, Typ 3950 10K mit 1 m Kabel
3,5-mm-Klinkenstecker
USB-A-nach-USB-C-Adapterkabel, 1 m
Platine 220684-1 v1.0

Gehäuse:
4× Stahlschraube, M2×12
4× Distanzröllchen 3 mm× 5 mmØ, Polyamid
4× Stahlmutter M2
8× Unterlegscheibe, M2 × 5 mmØ, Stärke 0,3 mm, Polyamid
4× Stahlschraube, M3×6
4× Unterlegscheibe, M3 ×7 mmØ, Stärke 0,5 mm, Polyamid
4× Abstandshalter, M3×8, Buchse-Buchse, Außendurchmesser 6 mm, Polyamid
4× Stahlschraube, M3×10, Senkkopf mit Innensechskant 2 mm
4× Stahlschraube, M3×12, Senkkopf mit Innensechskant 2 mm
4× M3-Stahlmutter, schwarz lackiert, Stärke 2,4 mm
4× selbstklebender Fuß, Höhe 3,8 mm, transparent, Polyurethan
6 Platten aus extrudiertem Acrylglas, Stärke 3 mm, transparent/klar: Rückseite, Vorderseite, Boden, 2× Seite und U-förmige Tastaturträger-Platte
2 Display-Trägerplatten aus extrudiertem Acrylglas, Stärke 5 mm, transparent/klar
3 Platten aus gegossenem Acrylglas, Stärke 3 mm, umbra-transparent (dunkelbraun): Displayrahmen, kleine Halterung für den Displayrahmen und Tastaturplatte

* siehe Text

Passendes Produkt

› **Elektor MultiCalculator Kit**
www.elektor.DE/20848

WEBLINKS

[1] Webseite zu diesem Artikel: https://elektor.de/220684-02
[2] Multicalculator bei Elektor Labs: https://t1p.de/m3dh2

Preiswerte GNSS-RTK-Systeme

Quelle: Shutterstock

Für zentimetergenaue Positionsbestimmung

Von Giovanni Carrera (Italien)

GPS, das Global Positioning System, ist bekannt und wird weltweit im Alltag eingesetzt. Weniger bekannt sind jedoch andere Systeme wie etwa GNSS RTK. Diese nehmen Trägerphasenmessungen an mehreren Satellitensystemen vor und erreichen eine Genauigkeit im Subzentimeterbereich – zu Preisen, die selbst im Hobby-Bereich erschwinglich sind.

Frühe RTK-Empfänger (**R**eal-**T**ime **K**inematic) waren ausschließlich bei professionellen Anwendungen wie topografischen Messungen zu finden. Professionelle Empfänger kosten immer noch mehrere tausend Euro. In den letzten Jahren sind allerdings Module auf den Markt gekommen, die viele Anwendungen ermöglichen und deutlich weniger kosten: Neben den traditionellen Anwendungen wie GIS (**G**eographic **I**nformation **S**ystem) eignen sich diese RTK-Empfänger vor allem für die Steuerung von Flugzeugen und anderen Fahrzeugen wie UAV (**U**nmanned **A**erial **V**ehicle) und UGV (**U**nmanned **G**round **V**ehicle), die zum Beispiel als landwirtschaftliche Traktoren und Drohnen eingesetzt werden.

Eine interessante Anwendung ist die Verwendung von zwei miteinander gekoppelten RTK-Empfängern, um damit nicht nur die Position, sondern auch den Kurs und die Drehung beziehungsweise die Neigung zu messen. So ein Satellitenkompass ist viel genauer als ein Magnetkompass und sogar als ein Kreiselkompass.

Ich habe drei RTK-Empfänger verwendet, deren Antennen auf dem Deck eines Schiffes montiert waren, um die drei Winkelbewegungen mit hoher Genauigkeit zu messen.

GNSS

Satellitennavigationsempfänger werden oft einfach als GPS bezeichnet. Die fortschrittlichsten Geräte sind in der Lage, Signale von verschiedenen Satellitensystemen wie dem russischen GLONASS, dem chinesischen BeiDou oder dem europäischen Galileo zu verarbeiten. Für diesen Typ hat sich die Bezeichnung GNSS (**G**lobal **N**avigation **S**atellite **S**ystems) eingebürgert. Im Gegensatz zu gewöhnlichen GPS-Empfängern können GNSS-Empfänger viel mehr Satelliten sehen, um die mit der besten Position und/oder den stärksten Signalen auszuwählen. Diese Fähigkeit von RTK-Systemen ist elementar, um Genauigkeiten von weniger als einem Zentimeter zu erreichen. Dabei wird auch die Phase der von den Satelliten gesendeten Trägersignale ausgewertet, wozu nur bestimmte Satellitenempfänger in der Lage sind. Die erreichbare Genauigkeit liegt hierbei in der Größenordnung von Zentimetern oder sogar Millimetern, je nach Qualität von Empfänger und Antenne. Diese ursprünglich für topografische Zwecke entwickelten, extrem teuren Empfänger sind in der Lage, zwei oder drei Träger zu empfangen. Hersteller wie die Schweizer Firma U-blox fertigen jedoch schon seit Jahren preiswertere Empfänger, die ebenfalls für Phasenmessungen geeignet sind. Das eigentliche Problem liegt hier in der immer noch recht teuren Software zur Verarbeitung dieser Signale. Der japanische Ingenieur Tomoji Takasu leistete mit seinen RTKLIB-Programmen [1] einen großen Beitrag zur Lösung dieses Problems, da er sie als Open Source zur Verfügung stellte. In der Zwischenzeit stehen immer leistungsfähigere Mikrocontroller zur Verfügung, mit denen man einen Empfänger mit direkter RTK-Signalverarbeitung realisieren kann, die ganz ohne PC eine Genauigkeit von einigen Zentimetern erlaubt. Und genau um solche Systeme geht es in diesem Beitrag. Angesichts der Komplexität dieses

Themas werde ich nicht auf Details von GNSS-Systemen eingehen, sondern verweise stattdessen auf online verfügbare Literatur unter [2] und [3].

Satellitensysteme

Der erste Prototyp eines GPS-Satelliten wurde im Februar 1978 in den Orbit gebracht. Erst 1995 erreichte das System seine volle Ausbaustufe für zivile und militärische Anwendungen.

Neben dem GPS der USA wurden auch andere Systeme wie das bereits erwähnte russische GLONASS, das chinesische BeiDou und das europäische Galileo entwickelt. Deren Satelliten erlauben eine höhere Genauigkeit von Empfängern. All diese Systeme nutzen geostationäre Satelliten und ein Netz von Bodenstationen, um langfristige Abweichungen korrigieren zu können. Die Ergebnisse sind zwar schlechter als bei DGPS (**D**ifferential-**GPS**), aber man kann zuverlässigere und genauere Messungen auch ohne komplizierte und teure Ausrüstung erreichen. Moderne Empfänger können Satellitensignale verschiedener Systeme empfangen, darunter auch von SBAS-Satelliten (**S**atellite-**B**ased **A**ugmentation **S**ystem) des amerikanischen WAAS (**W**ide-**A**rea **A**ugmentation **S**ystem) und des europäischen EGNOS (**E**uropean **G**eostationary **N**avigation **O**verlay **S**ervice). Die Trägerfrequenzen dieser Systeme sind unterschiedlich, so dass die Antenne für den Empfang aller Systeme ausgelegt sein muss. Präzisionsmessungen setzen Antennen hoher Qualität voraus, da diese die Ergebnisse stark beeinflussen. Damit Antennen nicht durch Multibeam-Reflexionen gestört werden, sollte man sie auf einer Metallplatte mit einem Durchmesser von mindestens 10 cm befestigen, die mit Masse verbunden ist.

Code und Phase bei Differentialempfang

Für eine hohe Positionsgenauigkeit sollten DGPS/DGNSS-Empfänger verwendet werden, denn GPS/GNSS-Systeme sind mit verschiedenen Messfehlern behaftet, die größtenteils auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in der Ionosphäre und Troposphäre zurückzuführen sind. Mit Letzteren erreicht man lediglich horizontale Positionierungsgenauigkeiten von 2...10 m. Differentieller Empfang erlaubt wesentlich höhere Genauigkeiten. Dabei werden im Prinzip zwei benachbarte Empfänger mit einem Abstand von weniger als 15 km für den Empfang von Satelliten des gleichen Systems eingesetzt. DGNSS-Empfänger reduzieren die Fehler durch die Differenz der Messungen zweier Empfänger. Wird nur der Code genutzt, reicht das lediglich für Genauigkeiten um einen Meter. Durch Auswertung der Phase des Trägersignals sind dann Genauigkeiten im Millimeterbereich möglich. Hier wird ebenfalls mit zwei Empfängern gearbeitet: einer Basis- und einer mobilen Station, die auch Rover genannt wird. Ein Rover unterscheidet sich von einem Standardempfänger dadurch, dass er eine Datenkorrektur auf der Grundlage der von der Basisstation kommenden Informationen vornimmt. Die Basisstation überträgt ihre zur Korrektur geeigneten Daten im Roh- oder RTCM-Format an den Rover. Beide Stationen müssen hierzu nahe genug sein (<10 km). Bei größeren Distanzen nimmt die Genauigkeit ab, da die Empfänger dann eine andere Satellitengeometrie „sehen". Die Basisstation überträgt die Roh-/RTCM-Daten über eine Funkverbindung via WLAN, Bluetooth oder mit einem speziellen Funkmodem – abhängig von den zu überbrückenden Entfernungen (siehe **Bild 1**). Wenn ausreichende Versorgung mit Mobilfunk gewährleistet ist, können die Daten via GSM, GPRS oder das Internet übertragen werden.

Herkömmliche GPS-Empfänger messen die Entfernung zwischen Satellit und Antenne, indem sie Code auswerten. Die Bits des PRN-Codes (pseudozufälliges Rauschen) werden mit einer Frequenz von 1,023 MHz erzeugt, was einer Wellenlänge $\lambda = 293{,}1$ m entspricht. Dies entspricht der Länge eines Bits. Die Korrelationsmessung der vom Satelliten und dem Empfänger erzeugten Codes erreicht knapp 1 % von λ, was zu einer Genauigkeit von 3...5 m führt, wenn man andere systemimmanente Fehler berücksichtigt. Ein DGPS-System mit kodierten Empfängern liefert zwar eine höhere Genauigkeit, unterbietet aber kaum eine Auflösung unter einem Meter. Der PRN-Code wiederholt sich jede Millisekunde, so dass die Entfernungsmessung eine Mehrdeutigkeit mit dieser Periode – etwa 300 km – aufweist. Das ist zwar beträchtlich, lässt sich aber reduzieren, da man die Entfernung mit einem Näherungswert von mindestens 100 km kennt. Für eine sehr genaue Positionsbestimmung muss der Empfänger aber auch die Phase des Trägersignals auswerten. GPS arbeitet mit den beiden Trägern L1 (λ = 19 cm) und L2 (λ = 24 cm). Da man Phasenverschiebungen von weniger als 1° messen kann, erreicht man damit prinzipiell eine Genauigkeit im Millimeterbereich, wenn man andere Störquellen vernachlässigt. Hier basiert die Entfernungsmessung darauf, dass man die Anzahl der Trägerzyklen zwischen Satellit und Empfangsantenne

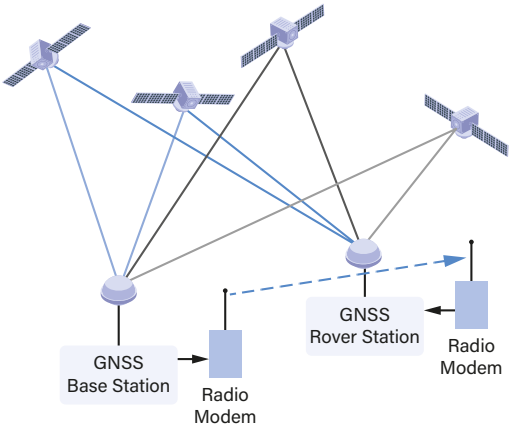


Bild 1. Differential-System.

▼

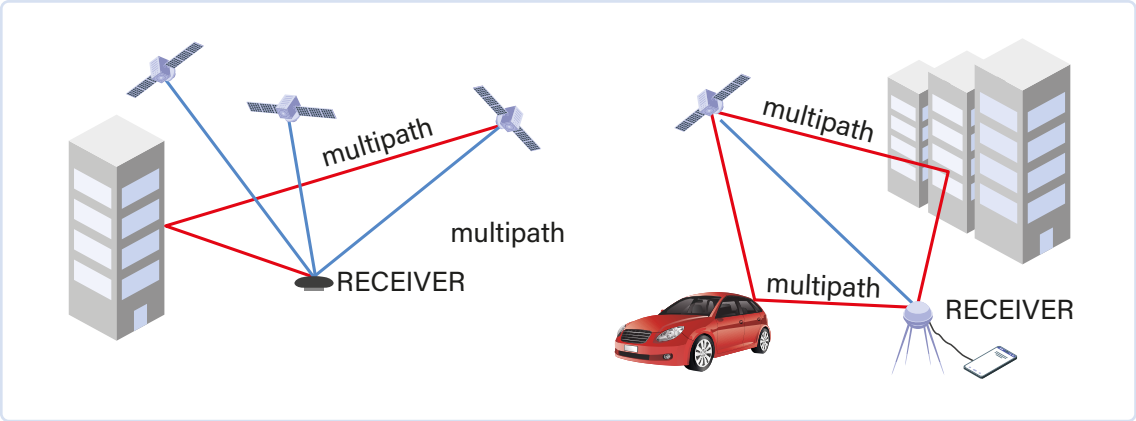


Bild 2. Multipath-Beispiele.

bestimmt und diese Zahl mit der Wellenlänge multipliziert. Die Berechnung der Anzahl ganzer Zyklen ist ein komplizierter, „Ambiguity Resolution" genannter Prozess. Hierfür werden mindestens sechs bis sieben Satelliten in guter Position benötigt. Die Auflösung der Mehrdeutigkeit erfordert so einige zehn Sekunden. Der Rover bestimmt seine Position mit Hilfe von Algorithmen, welche die Auflösung von Mehrdeutigkeit und eine Differentialkorrektur einbeziehen. Die Genauigkeit der Rover-Position hängt unter anderem von der Entfernung zur Basisstation (= baseline), der Genauigkeit der differentiellen Korrektur und der Qualität des Satellitenempfangs ab. Eine gute absolute Genauigkeit für topografische Zwecke erfordert die Kenntnis der Position der Basisstation, da sonst nur mit relativer Positionierung gearbeitet werden kann.

RTK-Messungen und Post-Processing

Präzise Positionsmessungen in Echtzeit erfordern ein RTK-System. Der Rover-Empfänger muss mit einem leistungsfähigen Prozessor ausgestattet sein, um die Lösung der Phasenmehrdeutigkeit berechnen zu können. Darüber hinaus muss der Rover die Korrekturdaten in Echtzeit empfangen. Solche Systeme sind komplex und erfordern eine Funkverbindung mit ausreichender Kapazität und Feldstärke, um das interessierende Gebiet abdecken zu können. RTK-Empfänger sind teurer als „normale" Empfänger mit Phasenauswertung, da sie mehr Rechenleistung benötigen. Dennoch braucht es für RTK-Empfänger keinen PC, außer man möchte damit die Messergebnisse anzeigen und/oder speichern.
Muss man die korrekte Position nicht in Echtzeit wissen, kann man auch mit Post-Processing leben. In diesem Fall benötigt das System keine Übertragung von Korrekturdaten. Die Basisstation und der Rover müssen leidglich einem kleinen Mikrocontroller ausgestattet sein, auf dem die Software für die Überwachung und Speicherung läuft. Alternativ genügt unter Umständen sogar ein kleiner serieller Datenlogger. Mit den Daten, die von den beiden Stationen im gleichen Zeitraum erfasst wurden, kann man nachträglich schnell die genauen Positionen des Rovers berechnen. Solch eine spätere Datenverarbeitung führt in der Regel zu genaueren Messungen, da bei einem PC mehr Rechenleistung zur Verfügung steht.

Grenzen von RTK-Systemen

Im Gegensatz zu den GPS-Empfängern in Smartphones oder Navigationsgeräten für Autos oder Schiffe, erfordern RTK-Systeme folgende Betriebsbedingungen für ihre erhöhte Genauigkeit:

- Entfernung zwischen Basis und Rover <10 km.
- Die Antenne muss den Himmel horizontal 360 ° und vertikal ≥15 ° erfassen.
- Abwesenheit von Funk-Störquellen.
- Empfang von Satellitensignalen besser -37 dB.
- Sieben oder mehr Satelliten mit guter Position.

Mauern, metallische Zäune oder Objekte, Masten, Bäume und sogar die Körper von Tieren können den Satellitenempfang beeinträchtigen. Alle durch Funkwellen nicht durchdringbare Objekte mit Abmessungen größer als λ des Trägersignals können stören. Bei GPS sind schon Objekte ab 19 cm relevant, die sich im Empfangsbereich der Antenne befinden. Diese Hindernisse blockieren nicht nur elektromagnetische Wellen, sondern können sogar als Reflektoren wirken und so störenden Mehrwegempfang verursachen (siehe **Bild 2**).
Bei einer reinen GPS-Konstellation kann es tagsüber zu Unterbrechungen kommen, wenn vorübergehend nicht mindestens sieben Satelliten mit guter Position empfangen werden können. Ein mit zwei oder mehr Systemen gleichzeitig operierender GNSS-Empfänger hat eine größere Anzahl von Satelliten zur Auswahl, von denen er diejenigen mit der besseren Position auswählt.

Antennenmontage

Wie bei allen Funkempfängern ist die Antenne sehr wichtig. Eine falsche Installation beeinträchtigt die Genauigkeit eines RTK-Systems erheblich. Die Position bezieht sich auf den Mittelpunkt der Antenne. Eine RTK-Antenne ist relativ einfach aufgebaut: Sie muss lediglich oberhalb des Horizonts isotrope Eigenschaften haben. Geeignet und gebräuchlich ist die Patch-Antenne. Mit ihrer flachen Form, und dem Aufbau aus leitenden Platten mit keramischem Material dazwischen, hat sie ein niedriges Profil und eine einfache quadratische oder kreisförmige Form. Sie ist oft auf einem magnetischen Sockel montiert und normalerweise aktiv. Der eingebaute Signalverstärker sorgt für eine an das Antennenkabel angepasste Ausgangsimpedanz von 50 Ω. Der Empfänger kann über das Antennenkabel phantomgespeist werden. Die Antenne muss in einer erhöhten Position in Bezug auf nahe gelegene Hindernisse montiert werden. Für RTK-Systeme gelten restriktivere Regeln als für ein

normales Navigationssystem, das zum Beispiel auch innerhalb eines Autos arbeitet.
Ein Antennenaufbau wie in **Bild 3a** ist auf jeden Fall zu vermeiden, da aufgrund dieses Profils keine Satelliten erfasst werden, die sich in einem Winkel von <45° rechts von ihr befinden. Die Antenne sollte – wie in **Bild 3b** gezeigt – mit einer geeigneteren Halterung montiert werden.

Rohe, RTCM- und RINEX-Daten

Wie bereits erwähnt, muss der Rover für die Ermittlung der korrekten Position in Echtzeit von der Basisstation phasengleiche Messungen zwecks Korrektur erhalten. Normalerweise gibt es Daten im Rohformat und im RTCM-Format. Das erste ist ein proprietäres Format des Hersteller des Empfängermoduls. Von daher sollten für beide Empfänger Module der gleichen Familie verwendet werden. Das Rohformat ist das vollständigere Format und führt zu einer höheren Genauigkeit. Allerdings müssen dafür mehr Daten übertragen werden, was aufgrund der erforderlichen höheren Bandbreite zu Problemen führen kann. Das RTCM-Format (Radio Technical Commission for Maritime Services) ist standardisiert. Die neuesten 3.x-Versionen bieten eine bessere Datenkompression und Nachrichtenintegrität als die älteren 2.x-Versionen. Bei der Nutzung von RTCM-Daten mit der damit verbundenen geringeren Genauigkeit kann man auch verschiedene Empfänger oder sogar Daten von einer regionalen Netzstation verwenden. Wichtig ist nur, dass die Versionen identisch sind. Mit RINEX (Receiver-Independent Exchange) gibt es sogar noch ein drittes, ebenfalls standardisiertes Format. Neuere Versionen tragen ebenfalls die Nummern 3.x. Da es sich um ein ASCII-Format handelt, ist es nicht sehr kompakt. Außerdem bieten nur die teuersten Receiver dieses Ausgabeformat an. Es wird auch häufig von Post-Processing-Software wie RTKPOST von RTKLIB verwendet. Falls die Daten nicht passend vorliegen, muss man die Rohdaten zunächst mit RTKconv nach RINEX konvertieren. Ein Übertragungssystem von der Basis-Station zum Rover ist dann nicht erforderlich, aber die Stationen müssen mit Datenloggern ausgestattet sein. Mit diesem bisher von mir verwendeten System liegen die Daten natürlich nicht in Echtzeit vor, aber man kann damit im Vergleich zu singulären RTK-Empfängern eine höhere Genauigkeit erreichen.

Netzwerke mit dezidierten Basisstationen

In einigen Regionen gibt es hochgenaue GNSS-Netze, die Echtzeitmessungen ermöglichen. Eines dieser Systeme ist NTRIP (**N**etworked **T**ransport of **R**TCM via **I**nternet **P**rotocol), das auch in RTKLIB implementiert ist. In Europa kann man sich bei EUREF [4] informieren. In Italien gibt es eine Reihe von Stationen, die jedoch nicht alle dieses Protokoll verwenden.
In diesem Fall ist der Rover-Empfänger nur mit einem Smartphone oder Tablet mit einer Sim-Karte und der RTKLIB-App verbunden. Die Genauigkeit ist viel geringer als bei zwei eigenen Stationen und hängt von der Entfernung der für die Korrektur verwendeten Referenzstation ab. Dieses System funktioniert nur, wenn das Mobiltelefon Empfang hat und NTRIP-Stationen in der Nähe vorhanden sind.

GNSS-Empfänger für RTK-Systeme

Heute gibt es mehrere Empfänger zu akzeptablen Preisen. Die billigeren Exemplare machen lediglich Phasenmessungen und übertragen sie an einen PC oder Raspberry Pi, auf dem das Open-Source-Programm RTKLIB von Tomoji Takasu installiert ist. Da es nichts kostet und stets aktuell ist, erfreut es sich einer weiten Verbreitung. Das Programm RTKPOST kann Daten im Roh- oder RINEX-Format für das Post-Processing verarbeiten. Vor dem Kauf eines GNSS-Empfängers sollte man sich aber vergewissern, dass er in der Liste RTKLIB-kompatibler Empfänger enthalten ist.
Tabelle 1 zeigt einige Beispiele für preiswerte Karten mit Trägerphasenmessung (RAW) und RTKLIB-kompatiblen Empfängern. Mit solch einer Karte und RTKLIB wird ein Computer zu einem kostengünstigen RTK-Systemen. Nur wenige U-blox-Module sind in der Lage, auch die Phase zu messen. NEO M8T ist das neueste Modul.

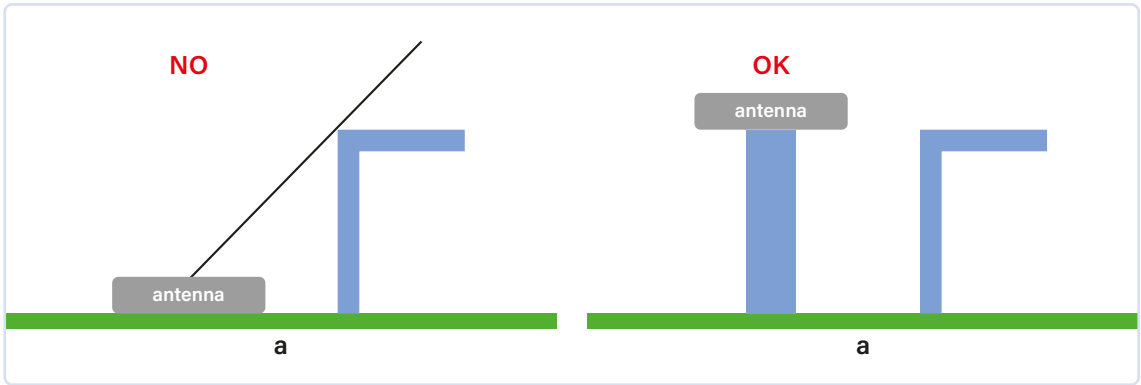


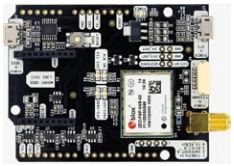
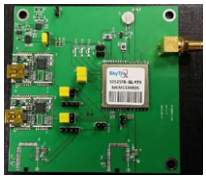
Bild 3. Kriterien der Antennenmontage.

◄

Tabelle 1. GNSS-Empfänger mit Phasenauswertung.

Board	Name und Hersteller	GNSS-Modul	Empfangene Satelliten
(Quelle: U-blox)	U-blox NEO-M8T Time & RAW Receiver	U-blox M8T	GPS, QZSS, GLONASS, BeiDou
(Quelle: NVS Technologies)	NV08C-CSM-BRD NVS Technologies	NVS NV08C	GPS, Galileo, GLONASS
(Quelle: NavSpark)	NS-RAW Carrier Phase Raw Measurement NavSpark	Venus822A	GPS, SBAS, QZSS

Tabelle 2. RTK-Empfänger.

Board	Name und Hersteller	GNSS-Modul	Empfangene Satelliten
(Quelle: U-blox)	NEO-M8P RTK GNSS	U-blox M8P	GPS L1 C/A, GLONASS L1OF, BeiDou B1I
(Quelle: NVS Technologies)	NV08C-RTK-M NVS Technologies	NV08C-RTK-M	L1 & L2 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
(Quelle: Mikroe)	GNSS RTK Click MIKROE-4456	U-blox ZED-F9P	GPS, GLONASS, Galileo und BeiDou + SBAS and QZSS
 *(Quelle: ArduSimple)*	simple RTK2B ArduSimple	U-blox ZED-F9P	GPS, GLONASS, Galileo und BeiDou + SBAS and QZSS
 *(Quelle: NavSpark)*	S2525F8-GL-RTK EVB	S2525F8-GL-RTK	GPS, GLONASS

Auch die Rohdaten liefernde NS-RAW-Karte von NavSpark ist interessant. Sie basiert auf einem Venus822A-Chip von SkyTraq und dem 32-bit-Mikrocontroller LEON3 Sparc-V8 mit einer 100-MHz-64-bit-Gleitkommaeinheit nach IEEE-754. Die Software wurde mit der Arduino-IDE entwickelt, wobei das Programm *Arduino NavSpark Boards by SkyTraq* über den *Card Manager* hinzugefügt wird. Der leistungsstarke Prozessor verfügt über 1.024 KB Flash-Speicher und 212 KB RAM. Die Stromversorgung erfolgt über den USB-Anschluss via 3-V-LDO-Spannungsregler. Der Anschluss der Satellitenantenne erfolgt über eine U.FL-Steckverbindung.
Beispiele preisgünstiger RTK-Karten sind in **Tabelle 2** aufgeführt. Diese Beispiele wurden bezüglich Preis ausgewählt. Mit den beiden letzten Empfängern der Liste habe ich ausgiebig und mit sehr guten Ergebnissen experimentiert. Das chinesische SkyTraq-System wurde vor fünf Jahren getestet und hat ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis. Dieser Empfänger wurde kürzlich durch einen leistungsfähigeren ersetzt. Bei Tests vor einigen Jahren zeigte das Schweizer System auf Basis des U-blox ZED-F9P eine seinem Preis angemessene bessere Leistung.

Test des SkyTraq S2525F8

Zur Vereinfachung der Tests wurde eine Entwicklungsplatine auf der Basis des SkyTraq S2525F8-GL-RTK-Moduls [5] verwendet. Dabei handelt es sich um einen RTK-Empfänger auf Basis des Venus8-Chipsatzes mit einem guten Preis-Leistungs-Verhältnis, der eine Auflösung im Zentimeterbereich bietet. Die günstigere Version liefert eine RTK-Messung pro Sekunde. Das Evaluation Board verfügt über zwei CP2102-basierte TTL/USB-Konverter für den Anschluss an den PC. Für den Betrieb an einem PC muss man natürlich den entsprechenden Treiber installieren. Standardmäßig hat der NMEA-Ausgang des Rovers eine Geschwindigkeit von 115.200 Bit/s, während die Basis im SkyTraq-Rohdatenformat mit 57.600 Bit/s sendet.
Bild 4 zeigt die für die Tests verwendete Antenne und die etwa 9×9 cm messende Platine. Die Antenne ist eine preiswerte Multibandversion für GPS/Galileo, BeiDou und GLONASS. Es handelt sich um eine aktive Antenne mit einem Gewinn von 25…27 dB, die mit 3,3 V bei einem Strom von 10 mA vom Empfänger gespeist wird. Sie ist mit 49×46×16 mm ziemlich kompakt und mit einem 3 m langen Koaxialkabel (RG174) mit SMA-Steckverbinder versehen. Zur Vermeidung von Multibeam-Empfang

◄ *Bild 4. Das GNSS-RTK-Board mit Antenne.*

▲ *Bild 5. Das Xbee-Funkmodem mit Antenne und Stromversorgung.*

wurden die Antennen auf einer mit Masse verbundenen Metallplatte mit einem Durchmesser von etwa 15 cm befestigt.

Wie bereits erwähnt, muss der Rover zwecks hoher Genauigkeit die Korrekturdaten von der Basisstation in Echtzeit empfangen. Die Datenpakete sind recht lang und ihre Länge variiert (siehe auch den Abschnitt „Code und Phase bei Differentialempfang" weiter oben).

Für dieses System war eine WLAN-Verbindung mit XBee-Geräten geplant, die unter suboptimalen Bedingungen bis zu einer Entfernung von etwa 800 m erfolgreich getestet wurde. Mit Antennen mit höherem Gewinn und ohne Hindernisse könnte sogar noch eine größere Reichweite erzielt werden.

Funkmodem-Vorschriften

Mit geltenden Grenzwerten für die üblichen freien Bänder kann man ein Signal mit auf einige kHz begrenzter Bandbreite bei direkter Sicht immerhin einige Kilometer weit übertragen. Die Regeln für das 2,4-GHz-Band sind weniger restriktiv, denn hier können ohne Genehmigung Sendeleistungen bis zu 100 mW für private Zwecke verwendet werden.

Aus diesem Grund wurde ein 2,4-GHz-XBee-Pro-S1-System von Digi International gewählt. Dabei handelt es sich um einen seriellen Datentransceiver mit bis zu 250 kBit/s, einer maximalen Ausgangsleistung von 18 dBm = 63 mW und einer Empfängerempfindlichkeit von -100 dBm. Er wird mit 3,3 V versorgt und hat einen invertierten SMA-Antennenanschluss (RP-SMA). Zur Vervollständigung braucht man noch eine Rundstrahl-Stabantenne mit RP-SMA-Buchse und einen 90°-Adapter sowie einen 3,3-V-Regler für die Versorgung aus 5 V. **Bild 5** zeigt die verschiedenen Elemente der beiden per Funk verbundenen Geräte.

Beim XBee-Modul der Basisstation ist die Leistung auf 3 (hoch) und nicht auf 4 (am höchsten) eingestellt, was einer Sendeleistung von 16 dBm = 40 mW entspricht.

Konfiguration der RTK-Empfänger

Hierzu muss man die Datei *GNSS_Viewer.zip* [6] downloaden. Dieses Programm wird zur Konfiguration des Empfängers und zur Anzeige der RTK-Messungen des Rovers verwendet. Das Programm im Archiv *GNSS_Viewer-NmeaPlayer.zip* dient nicht zur Konfiguration, sondern ist für die Anzeige von RTK-Messungen und zuvor aufgezeichneten Daten im NMEA-Format gedacht. Die zugehörigen Anleitungen sind auch als PDF-Datei verfügbar. Für die Karten-Konfiguration besonders wichtig ist die Datei *Getting_Started_with_S2525F8-BD-RTK-EVB.pdf*.

Die Ausgabe erfolgt im Standard-NMEA-Format, außer dass Breiten- und Längengrad mit sieben Dezimalstellen statt den üblichen Stellen eines normalen Empfängers angezeigt werden, der keine auf der Phase basierende Sub-Zentimeter-Auflösung liefern kann.

Tests bei geringen Entfernungen

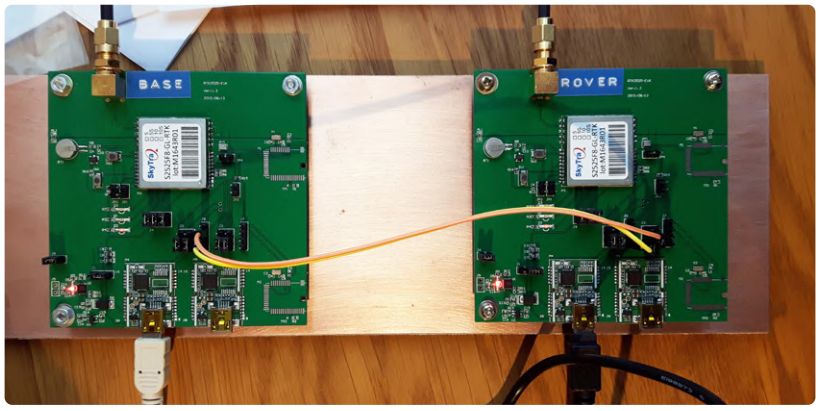
Bei Vorversuchen wurde einfach eine kurze Leitung verwendet: Neben der Masseverbindung war Port 1 der Basis (Tx1 an J8) mit Port 2 des Rovers (Rx2 an J3) verbunden (siehe **Bild 6**).

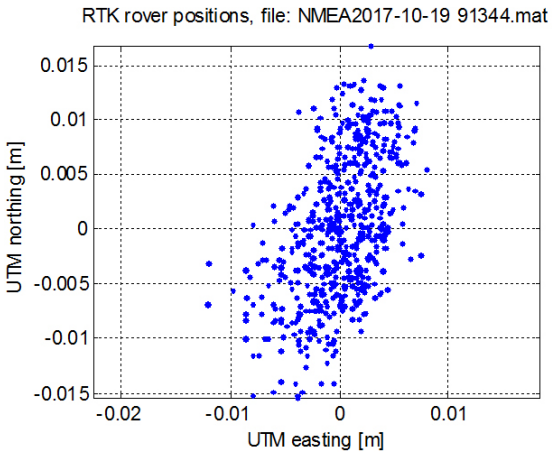
Die Stromversorgung beider Empfänger erfolgte über zwei in einen einzigen PC eingesteckte USB-Kabel. Das System schaltete schnell in den RTK-Modus. Die Basisstation lieferte sehr gute Ergebnisse, was wohl auf genügend empfangbare Satelliten mit guten Positionen zurückzuführen war. Während des gesamten Tests wurde eine sehr gute RTK-Lösung vom Typ FIX (Q = 4) erreicht (siehe **Bild 7**).

Die Ergebnisse werden auch durch den CEP95-Kreisradius (enthält 95 % der Messungen) von nur 12 mm bestätigt. Die Punktwolke ist auf der x-Achse stärker gequetscht, da mein Haus die Sicht auf einige tief am Horizont stehende Satelliten im Norden behinderte.

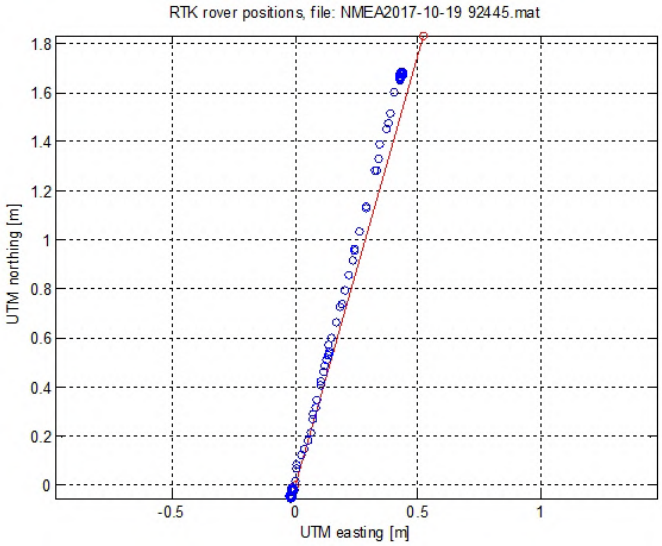
Für das NMEA-Parsing und zur Datenauswertung habe ich mehrere Programme in MATLAB geschrieben.

▼ *Bild 6. Direktverbindung.*





▲ *Bild 7. Tests an der Basisstation.*



▲ *Bild 8. Geradlinige Bewegung.*

Zur Umrechnung der Breiten- und Längengrade in UTM-Koordinaten wurde die Funktion *wgs2utm.m* von Alexandre Schimel verwendet. Für einen ersten Test bei Bewegung wurde eine Schiene aus einem Aluminiumprofil angefertigt, und die an einem Holzschlitten befestigte Rover-Antenne auf zwei seitlichen Kufen an der Schiene entlanggeführt. Der Schlitten wurde mit einem Seil gezogen, wobei die Geschwindigkeit so gleichmäßig wie möglich gehalten wurde.

Bild 8 zeigt den geraden Weg von Süden nach Norden. Die Linie wurde zwischen den beiden aus Durchschnittswerten von Festpunktmessungen errechneten Punkten gezogen. Aus mechanischen Gründen wurde der südlichste Punkt während des Versuchs nicht erreicht. Die Punkte sind nicht äquidistant, da das Seil von Hand gezogen wurde. Die Ergebnisse der Tests sind sogar dafür sehr gut, dass der Standort für den Satellitenempfang nicht optimal war.

Das Modul Ublox ZED-F9P

Das in **Bild 9** gezeigte Modul ZED-F9P [7] kann mehrere Satellitensysteme empfangen und verfolgen: GPS, GLONASS, Galileo und BeiDou, sowie SBAS- und QZSS-Satelliten (siehe **Tabelle 3**). Alle erfassten Satelliten lassen sich mit Korrekturdaten zu einer RTK-Navigationslösung erweitern. Im RTK-Modus erreicht ZED-F9P eine Positionsgenauigkeit im Zentimeterbereich, was durch zahlreiche Tests unter verschiedenen Bedingungen bestätigt wurde. Das Modul verfügt über eine USB-Schnittstelle, zwei UART-Ports sowie I²C- und SPI-Schnittstellen.

Das Board RTK2B-V3

Das Board RTK2B [8] von ArduSimple ist sehr kompakt und vielseitig. Neben dem ZED-F9P-Modul verfügt es auch über einen Xbee-Stecker mit USB/TTL-Konverter und einen zweiten USB-Anschluss für die Programmierung. Von ArduSimple gibt es eine Reihe von Modulen für Bluetooth, 4G, WLAN, Lora et cetera, die auf die Schnittstelle für die Funkkommunikation passen. **Bild 10** zeigt die dem Arduino UNO/Zero ähnelnde Platine, zu denen sie auch kompatibel ist. Die I/O-Pins sind zu Pegeln mit 1,8 V, 3,3 V und 5 V kompatibel und werden automatisch über die IOREF-Spannung angepasst.

Das Board kann direkt über die Arduino-Header oder über einen Micro-USB-Anschluss mit Strom versorgt werden und verträgt auch die gleichzeitige Verbindung mit zwei Stromversorgungen (per Header und via USB). Die Leistungsaufnahme beträgt ohne Xbee-Module 204 mW. Das Board ist mit einem integrierten LDO-Regler ausgestattet. Dank eines Spannungsabfalls von nur 390 mV kann das Board mit einer einzigen Lithiumzelle versorgt werden. Zahlreiche LEDs ermöglichen die Überwachung von Betriebszuständen. Die Platine verfügt über verschiedene Anschlüsse für die Verbindung mit Systemen vom Typ ArduPilot für hochgenaue Positionsanwendungen.

Bild 9. Das Modul ZED-F9P. (Quelle: U-blox)

▼

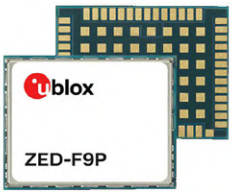


Tabelle 3. Bänder und Frequenzen von Satellitensystemen.

GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
L1C/A (1,575.42 MHz)	L1OF (1.602 MHz + k * 562,5 kHz, k = –7, ..., 5, 6)	E1-B/C (1.575,42 MHz)	B1I (1.561,098 MHz)
L2C (1,227.60 MHz)	L2OF (1.246 MHz + k * 437,5 kHz, k = –7, ..., 5, 6)	E5b (1.207,140 MHz)	B2I (1.207,140 MHz)

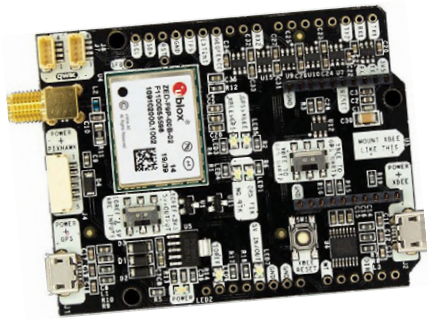
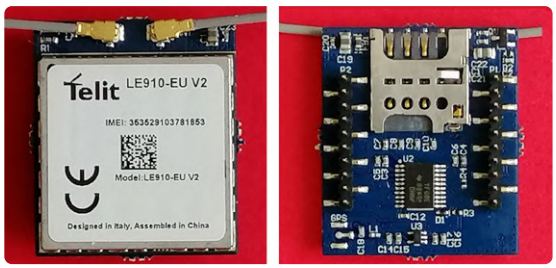


Bild 10. Das Board simpleRTK2B V3 von ArduSimple. (Quelle: U-blox)



▲ Bild 11. Das 4G-LTE-Modul. (Quelle: Telit)

RTK-Tests mit NTRIP

Die ersten Tests wurden mit der Korrektur durchgeführt, die von einer Referenzstation des ligurischen Regionalnetzes über NTRI gesendet wurde, wobei zunächst ein PC mit der Software U-Blox *U-Center* und dann ein 4G-Modul (siehe unten) auf dem ArduSimple Xbee-Slot verwendet wurde. Die Verbindung zum Internet über den PC ermöglichte es, die NTRIP-Konfiguration besser zu wählen. NTRIP ist ein vom deutschen BKG (**B**undesamt für **K**artographie und **G**eodäsie) Ende 2004 entwickeltes Protokoll für das Streaming von DGPS- oder RTK-Korrekturdaten über das Internet. Mit einem PC oder internetfähigen Mobiltelefon ist NTRIP die beste Möglichkeit, RTCM-Nachrichten an den RTK-Empfänger des Rovers zu senden, ohne ein teures lokales Funkmodem verwenden zu müssen, das aufgrund der Vorschriften beim Thema Funkkommunikation nur eine geringe Leistung und damit eine kurze Reichweite hätte.

Das 4G-LTE-Modul

Das 4G-Modul LE910 V2 stammt von Telit. Seine für Europa, den mittleren Osten und Asien geeigneten Bänder sind:

- 4G-Bänder (MHz): B1 (2.100), B3 (1.800), B7 (2.600), B8 (900), B20 (800)
- 3G-Bänder (MHz): B2 (2.100), B8 (900)
- 2G-Bänder (MHz): B3 (1.800), B8 (900)

Dieses Modul wird von ArduSimple auf ein XBee-kompatibles Board montiert, das in **Bild 11** zu sehen ist. Das Modul benötigt eine hohe Leistung und muss auf Platinen des Typs RTK2-V3 montiert werden.
Für die Konfiguration des Moduls habe ich mich an die Anweisungen des RTK2B-V3 Boardhookup-Guide gehalten. **Bild 12** zeigt das Schema der Funktionen. Ein System auf der Basis des 32-bit-Mikrocontrollers SAMD21 samt 2,4-Zoll-TFT-Display wurde ebenfalls für einige Tests verwendet. Dafür habe ich auch eine Software zur Berechnung kartesischer Koordinaten in Metern (UTM: **U**niversal **T**ransverse **M**ercator) entwickelt. **Bild 13** zeigt dieses auch als Logger dienende System.
Um eine hohe Auflösung zu erreichen, muss der High Precision Mode eingestellt werden. Dann haben Breiten- und Längengrad sieben und die Höhe drei Nachkommastellen. Ist der Rover mit dem PC verbunden, startet man die Anwendung *U-Center*. Im Menü *Configure*

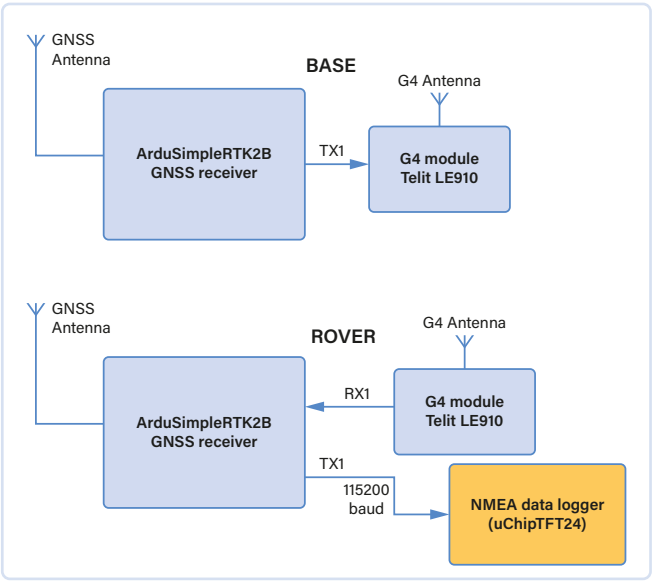
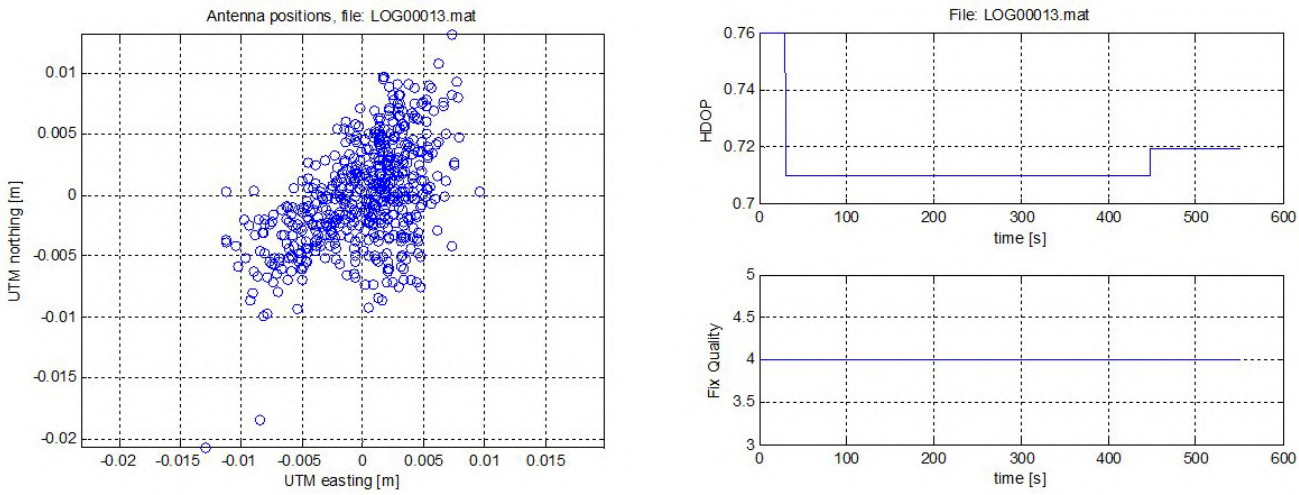


Bild 12. Schema des Systems.

▲ Bild 13. Der Mikrocontroller.



▲ *Bild 14. Fixpunkt-Test.*

wählt man dann das *NMEA protocol* aus, klickt auf *High Precision Mode* und speichert die Konfiguration.

Feststation-Messungen (NTRIP)

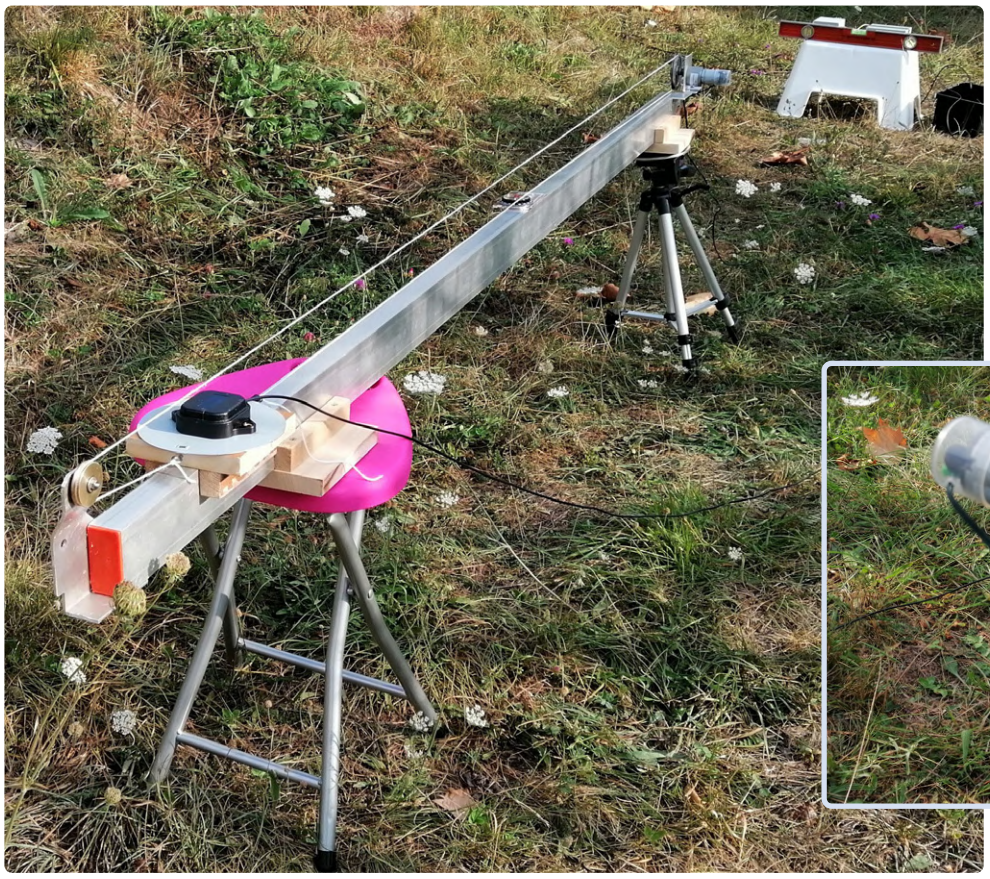
Hier die Resultate meines Matlab-Programms:

```
File name = LOG00013.mat
Values averaged on 551 epochs, from point =
  1, to point = 551
Initial GPS time = 32779 and final = 33329
CEP R95 = 0.010 m
```

Obwohl die Referenzstation 16 km entfernt ist und der Himmel nicht vollständig sichtbar war, sind die Ergebnisse hervorragend (**Bild 14**).

Konstante, geradlinige Bewegung

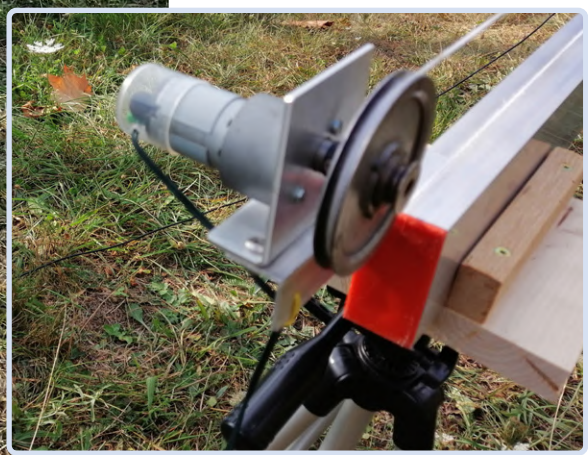
Für diesen Test wurde eine spezielle Vorrichtung aus einem Aluminiumprofil gebaut, auf dem ein Holzschuh gleiten konnte, der von einem elektrischen Getriebemotor an einem Seil über eine Umlenkrolle gezogen wurde. **Bild 15** zeigt die Schiene mit der auf dem Schlitten montierten Antenne. Die Nahaufnahme von **Bild 16**

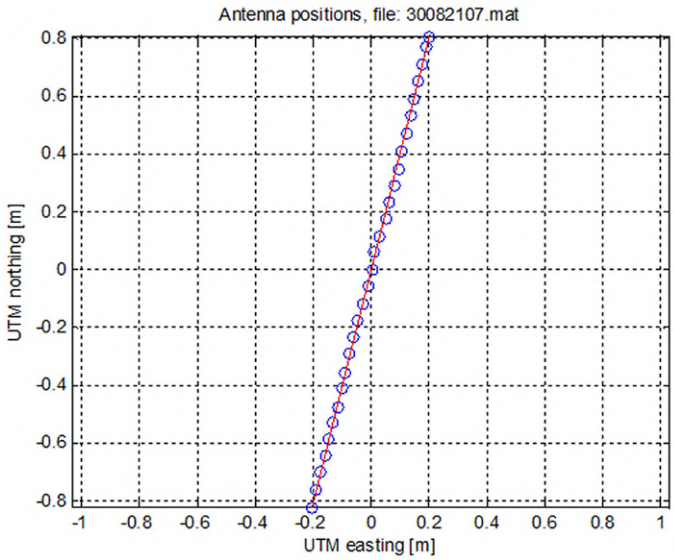


◀ *Bild 15. Aufbau für Test an bewegtem System.*

Bild 16. Nahaufnahme des Antriebs.

▼





▲

Bild 17. Tests bei geradliniger Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit.

zeigt den Getriebemotor und die Umlenkrolle. Die Schiene wurde sorgfältig nivelliert, und ihre Ausrichtung wurde auch mit einem Kompass vermessen. Hier die Ergebnisse meiner Matlab-Programme:

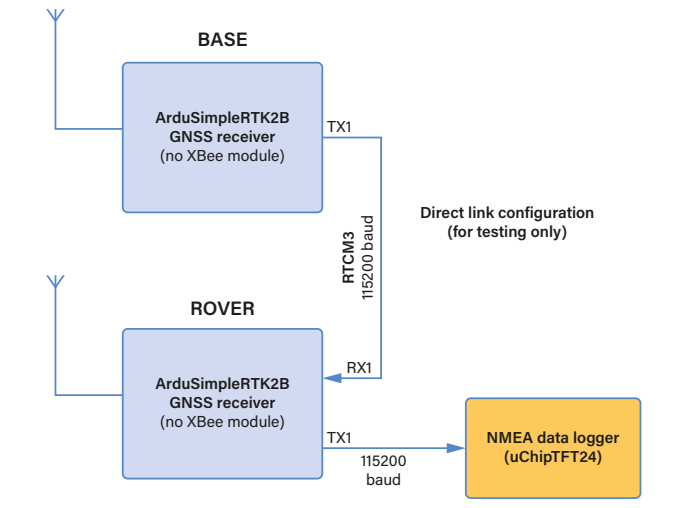
```
File name = 30082107.mat
Values averaged on 29 epochs, from point =
  309, to point = 337
Initial GPS time = 26030 and final = 26058
Path traveled = 1.678 m
Mean speed = 0.0599 m/s
```

Wie in **Bild 17** zu sehen ist, war diese Messung sehr gut, da der Standort weniger Hindernisse aufwies, und sogar die niedrigsten Satelliten im Norden erfasst werden konnten. Die Bahn ist praktisch gerade.

Der Lauf dauerte 28 s mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von etwa 60 mm/s (= 2,16 km/h). Die Messungen an festen Positionen an den Enden der Bahn brachten hervorragende Ergebnisse mit einem CEPR95 von nur 6 mm.

Bild 18. Konfiguration mit direkter Verbindung.

▼



Feststation-Messungen (kurze Distanz / direkte Verbindung)

Bei diesem Empfängertest ist das Übertragungssystem für die Korrekturdaten durch ein einfaches Kabel realisiert (**Bild 18**). Dieses System sollte die höchste Genauigkeit bieten, da die beiden Antennen nur wenige Meter voneinander entfernt sind, und es keine Störungen der Funkverbindung gibt.

Der Rover muss für die NMEA-Ausgabe mit 115.200 bd konfiguriert werden. Der Datenlogger (ArduLog) speichert die NMEA-Datensätze auf einer SD-Karte. Der Tx1-Ausgang des Rovers muss für das NMEA-Protokoll im High Precision Mode konfiguriert sein (Koordinaten mit sieben Nachkommastellen). Der für diesen Test verwendete Datenlogger war ein System vom Typ OpenLog.

Für die Verkabelung wurden Arduino-Schienen verwendet, und der Rover wurde zwecks Stromversorgung und Überwachung per USB an den PC angeschlossen. Nachstehend sind die Ergebnisse dieses Versuchs aufgeführt:

```
File name = LOG00014.mat
Values averaged on 578 epochs, from point =
  1, to point = 578
Initial GPS time = 42023 and final = 42600
Elevation = 685.24 m
CEP R95 = 0.007 m
```

TS – 220307-02

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Anmerkungen zu diesem Artikel? Schicken Sie eine E-Mail an Elektor unter redaktion@elektor.de.

Über den Autor

Giovanni Carrera hat einen Abschluss in Elektrotechnik. Als Professor an der Fakultät für Schiffstechnik in Genua, Italien, gab er Kurse über Schiffsautomatisierung und die Simulation von Schiffsantrieben. Carrera beschäftigte sich in den späten 1970er Jahren mit der 6502-CPU und später dann mit anderen Prozessoren. Heute entwickelt er gerne analoge und digitale Elektronik, die er in seinen Blogs (ArduPicLab und GnssRtkLab) und verschiedenen Zeitschriften veröffentlicht hat.

Passende Produkte

- **GNSS Multi-Band-Antenne mit Magnetfuß und 5 m Kabel (SMA)**
  https://elektor.de/19649
- **GPS-Boards und mehr bei Elektor**
  www.elektor.de/catalogsearch/result/?q=GPS

WEBLINKS

[1] RTKLIB: Ein Open-Source-Programmpaket zur GNSS-Postionsbestimmung: https://rtklib.com
[2] Einführung in GNSS: https://novatel.com/an-introduction-to-gnss
[3] Understanding GPS, Principles and Applications, E. D. Kaplan, C. J. Hegarty, Artech House, 2006: https://us.artechhouse.com
[4] Euref-ip.net GNSS Streaming Server: https://euref-ip.net/home
[5] Getting Started with S2525F8-BD-RTK EVB or S2525F8-GL-RTK EVB, NavSpark: https://t1p.de/y9zsi
[6] GNSS Viewer: https://tinyurl.com/y65kjvzk
[7] Datenblatt ZED-F9P U-blox F9, UBX-17051259-R08: https://t1p.de/116f1
[8] SimpleRTK2B V3 Hookup Guide: https://tinyurl.com/24h3ypsf

Platinenlayout und Sicherheit

Tipps für sichere und langlebige Leiterplatten

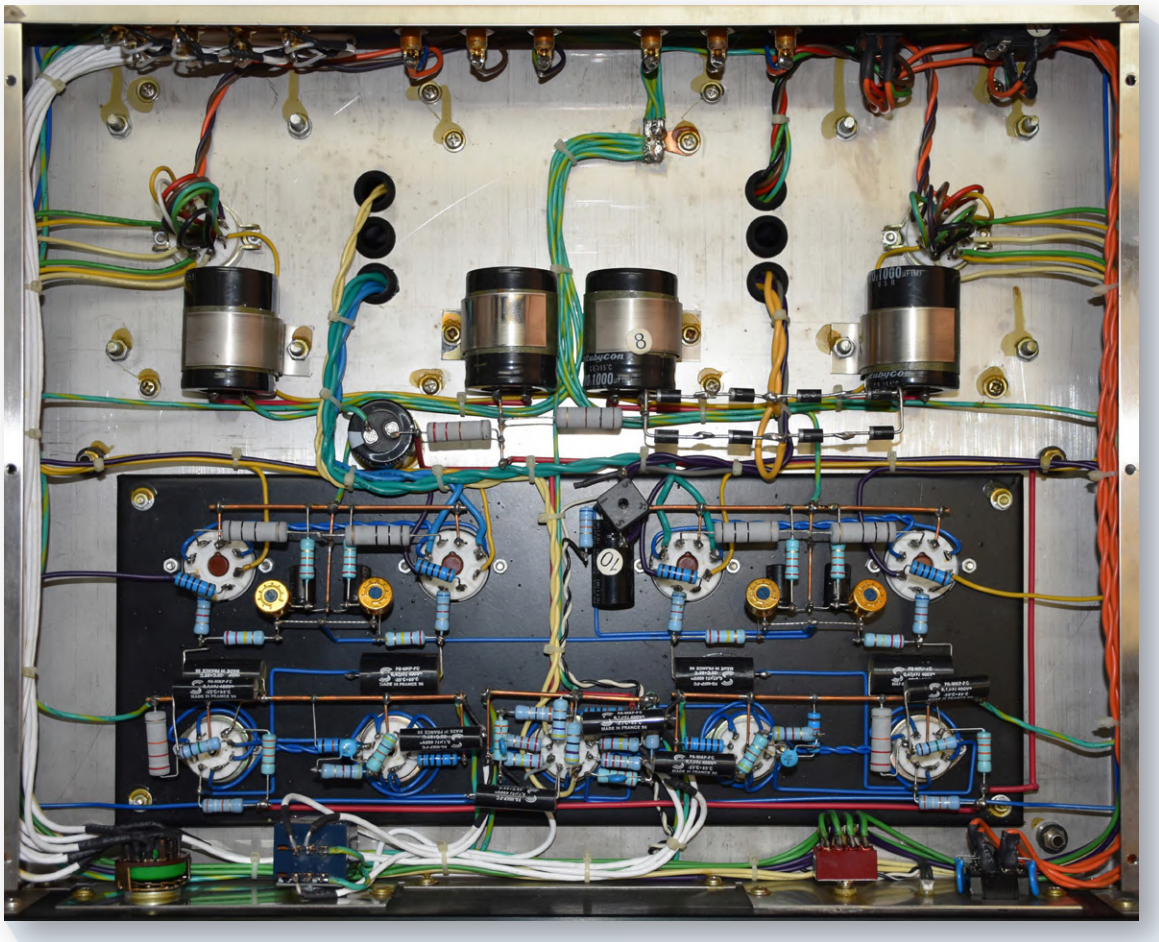


Bild 1. Unteransicht eines fliegend verdrahteten Verstärkers mit KT-88-Röhren im Besitz des Autors. Die Bauteile sind ordentlich angeordnet, die Wärmeableitung ist gut. Der Bereich, in dem eine zusätzliche elektrische Isolierung erforderlich war, ist an dem schwarzen Glasfaserabschnitt zu erkennen. Sperrige Bauteile wie Elektrolytkondensatoren wurden mit einzelnen Halterungen (Metallklammern) montiert. An manchen Stellen sind die Bauteile übereinander angeordnet, was Reparaturarbeiten erschwert.

◀

Von Roberto Armani (Elektor) und Marco Castiglioni (Italien)

Im Vergleich zur fliegenden Verdrahtung ermöglicht es uns die Platine, unsere Designs professionell, rational und kompakt zu gestalten. Damit jedoch ein sicherer Betrieb gewährleistet ist, müssen bei hohen Spannungen und/oder starken Strömen einige grundlegende physikalische Aspekte berücksichtigt werden. In diesem Artikel betrachten wir, was zu tun ist, aber noch wichtiger, was *nicht* getan werden darf!

Die gedruckte Schaltung, Leiterplatte oder Platine (PCB) hat die Herstellung elektronischer Schaltungen zweifellos revolutioniert. Die ersten Beispiele für die zivile Nutzung von Platinen gehen auf das Jahr 1948 zurück, und seither hat die Technik ihrer Herstellung große Fortschritte gemacht. Wenn Sie sich für die gesamte Entwicklung der Technologie der gedruckten Schaltungen interessieren, sollten Sie bei [1] vorbeischauen.

Vor dem Aufkommen von Platinen wurden Bauteile beziehungsweise ihre Anschlussdrähte direkt miteinander in der Luft verbunden (**Bild 1**). Luft ist bekanntlich ein hervorragender Isolator, und der beträchtliche Abstand zwischen den einzelnen Bauteilen begünstigte die Wärmeableitung. Alles gut also? Nicht wirklich. Die Schaltungen benötigten zur Montage schwere verzinnte Eisenrahmen; die Konstruktionen erreichten oft enorme

Tabelle 1: PCB-Material und Anwendung

ε_r = Stoffabhängige Permittivitätszahl, die Eigenschaft eines Materials, die die Übertragung einer elektromagnetischen Welle verhindert

T_g = Glasübergangstemperatur, die Temperatur, bei der das Material von einem starren in einen verformbaren Zustand übergeht

Materialtyp	ε_r *(bei 1 MHz)*	T_g (°C)	Anwendung
FR4	4,2…4,8	135…140	Standard
FR4	4,5…4,8	150…170	Standard/Bleifrei
FR4	3,4…3,8 (bei 1 GHz)	180…220	Hochgeschwindigkeitssignale
PTFE	2,2…2,8	160	Hochfrequenz
Polyamide	3,8…4,2	>=250	Hochtemperatur

Größen und Gewichte, und die vollständig manuelle Bauweise kostete ein Vermögen. Diese Lösung war aber seinerzeit praktikabel, da Geräte mit Elektronenröhren ohnehin sehr sperrig waren und das Platzproblem nicht durch eine oder mehrere Platinen gelöst worden wäre. Im Beispiel von Bild 1, die Unteransicht eines Verstärkers mit KT-88-Vakuumröhren, ist das Layout recht übersichtlich, die Wärme erzeugenden Bauteile sind gut belüftet und – da sie in der Luft verdrahtet sind – gut voneinander isoliert, auch wenn Hochspannung (800 V_{DC}) in einigen Teilen der Schaltung droht.

Neben dem Platzbedarf ist die Wartung einer solchen Verdrahtungslösung problematisch, insbesondere bei Komponenten, die auf sich überlappenden Ebenen montiert sind und die in einigen Fällen demontiert werden müssen, um an die zu ersetzenden Bauteile auf einer unteren Ebenen zu gelangen.

Mit dem Aufkommen der ersten kleineren Halbleiter änderte sich alles, und die ersten gedruckten Schaltungen ermöglichten kleinere, kompaktere und kostengünstigere Aufbauten. Gleichzeitig brachte dies aber einige neue Probleme mit sich, insbesondere in Bezug auf Isolierung, Wärmeableitung, parasitäre Kapazitäten, Übersprechen zwischen Leiterbahnen und EMI-Störungen. In diesem Artikel konzentrieren wir uns hauptsächlich auf die Sicherheitsaspekte, das heißt auf die Hochspannungsisolation und die Wärmeableitung im Allgemeinen.

Materialien

Das Basismaterial für Platinen kann starr oder flexibel oder beides sein. Die Wahl hängt selbstverständlich (auch) von der Art der Anwendung und der zu erwartenden Betriebstemperatur der Schaltung ab. Das heutzutage am häufigsten verwendete Material ist eine Verbindung aus Glasfaser und Harz, genannt FR4 (Flame Resistant Nr. 4), spezifiziert in der Norm IPC-4101E [2]. Je nach Verwendungszweck werden auch andere Materialien eingesetzt, wie in **Tabelle 1** beschrieben.

Isolierung

Zwar haben Platinen den Platzbedarf elektronischer Geräte verringert, aber die Verringerung der Abstände zwischen den Leitern auch den Isolierungsaspekt kritischer gemacht, was bei der Gestaltung des Platinenlayouts größere Sorgfalt erfordert. Es gibt viele Variablen, die bei der Berechnung des Mindestabstands zwischen zwei Leitern (in unserem Fall Leiterbahnen) auf der Platine berücksichtigt werden müssen, zum Beispiel:

- Betriebsspannung
- Art des dielektrischen Materials der Leiterplatte
- Anzahl der Platinenschichten
- Vorhandensein von Leitern in den Zwischenlagen (von Platinen mit drei oder mehr Schichten)
- Vorhandensein einer Oberflächenbeschichtung
- Atmosphärischer Druck

Aus Zeitersparnisgründen und um den Großteil unserer Schaffenskraft dem eigentlichen Entwurf zu widmen, kann ein spezielles Werkzeug nützlich sein, zum Beispiel das in KiCad integrierte Tool oder andere PCB-CADs. Für professionellere Anwendungen kann man auch zum *PCB Tool Design Kit* greifen, das von *Saturn PCB Design Inc.* kostenlos zur Verfügung gestellt wird und unter [3] heruntergeladen werden kann.

In **Bild 2** sehen wir das Hauptfensters dieses Programms mit der Vielzahl von Tabs zur Auswahl. Für die Bewertung der Isolierungsanforderungen können wir uns auf den Tab *Minimum Conductor Spacing* konzentrieren, bei dem der Berechnungsalgorithmus auf den Spezifikationen der IPC-2221B-Spezifikation basiert [4].

Man kann mit der Auswahl eines Spannungsbereichs aus der Tabelle beginnen. Die angegebenen Werte gelten direkt für Gleich- und Wechselspannungsspitzen. Bei einer Netzspannung von effektiven 230 V beispielsweise beträgt der zu berücksichtigende Spitzenwert 325 V und somit der zu wählende Bereich 301…500 V.

Bei Spannungen über 500 V kann die Option >500 V

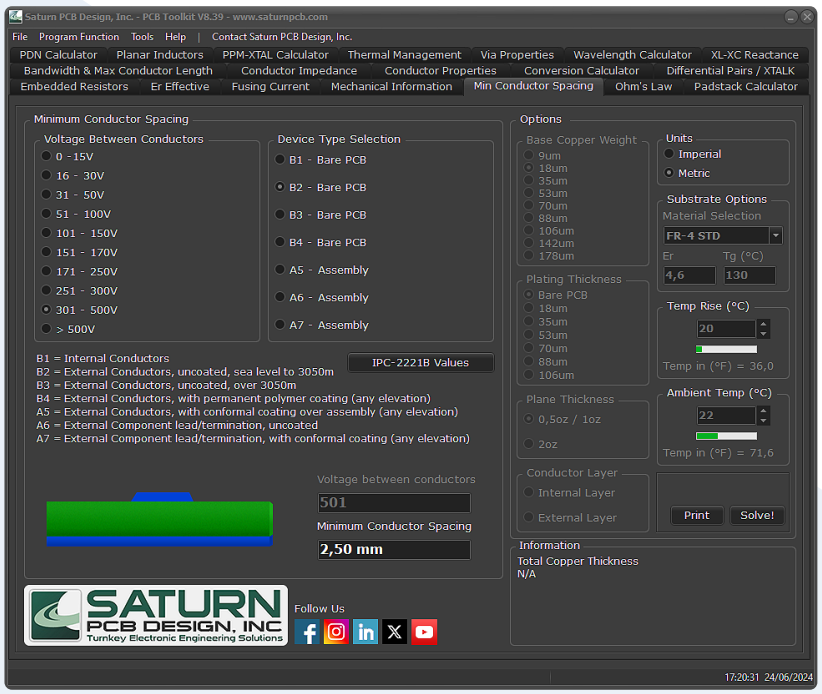


*Bild 2. Das Menü **Min Conductor Spacing** im PCB Toolkit von Saturn. Nach dem Standard IPC-2221B muss bei Eingangsspannungen von 230 V_{AC} der Abstand 2,5 mm und von 115 V_{AC} 1,25 mm betragen.*

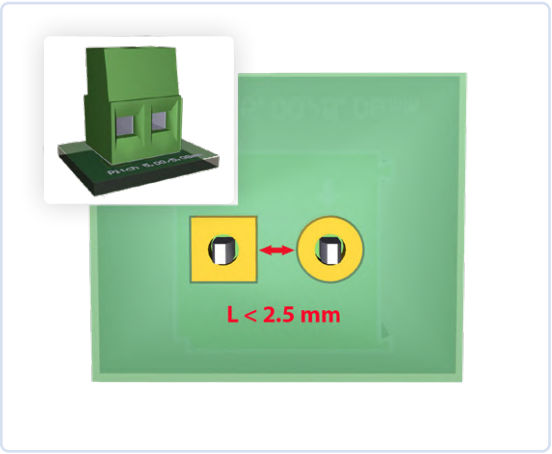


Bild 3. Bei einem Hochspannungseingang von 230 V_{AC} muss der Mindestabstand zwischen den Leitern 2,5 mm betragen. Die gezeigte Platinenklemme mit einem Rastermaß von 5 mm ist dafür nicht geeignet!

Bild 4. Ein zwischen Pads und Leiterbahnen gefräste Schlitz erhöht die Isolation auf einer Platine erheblich. Solche Ausschnitte eignen sich auch hervorragend zur Trennung von Bereichen mit großen Potentialunterschieden.

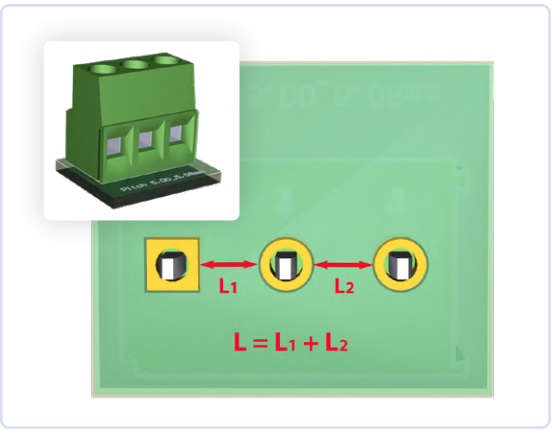


Bild 5. Lässt man den mittleren Kontakt des Klemmverbinders frei (sowohl Kabel als auch Leiterbahnen), so dass der Anschluss „schwebt" (Floating), verdoppelt sich der Isolationsabstand und der Anschluss der Netzspannung von 230 V_{AC} am Eingang ist möglich.

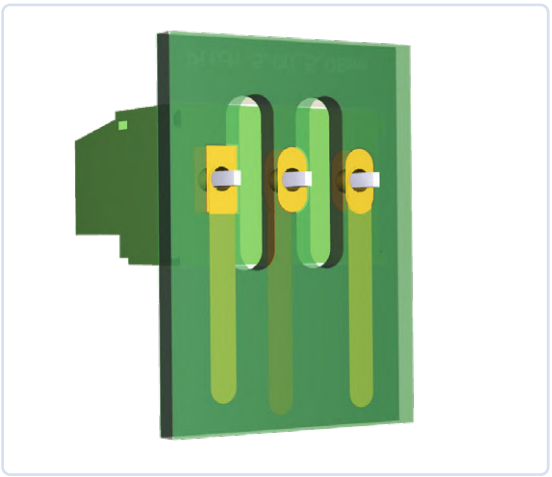


Bild 6. Anwendungsbeispiel einer 3-poligen Schraubklemme mit doppelter Fräsung. Diese Lösung ermöglicht den Anschluss einer Netzleitung mit L, N und PE.

gewählt und der Wert im (dann aktiven) Feld *Voltage between conductors* eingegeben werden. Nach Eingabe des Wertes muss der Button *Solve!* geklickt werden, um das Ergebnis zu erhalten.
Dann wählt man die Option *B2*, eine der sieben verfügbaren im Menü *Device Type Selection*, die sich auf unbeschichtetes Platinenmaterial und eine Standardhöhe bis 3050 m über dem Meeresspiegel bezieht. Die verschiedenen Auswahlmöglichkeiten werden direkt unter dem Feld kurz erläutert.
Durch die Auswahl der verschiedenen Optionen (für die gleiche Spannung) kann sofort überprüft werden, welcher Mindestabstand zwischen den Leitern einzuhalten ist. Für die Netzspannung im obigen Beispiel zeigt das System einen Wert von 2,5 mm an.

Hinweis: Bei Betriebshöhen über 3050 m NHN ist zu beachten, dass sich der notwendige Isolationsabstand erheblich vergrößert, da nur ein hoher atmosphärischer Druck Lichtbogenphänomene begrenzt. Wenn die Schaltung, die wir entwerfen, in großer Höhe verwendet werden soll, ist es empfehlenswert, sie mit einer Isolierbeschichtung zu schützen, anstatt sich nur auf den Abstand zwischen den Leiterbahnen zu verlassen.

Abstand halten!

Nachdem wir festgestellt haben, was der Mindestabstand für unsere Anwendung ist, sehen wir uns an, wie dieser auf der Leiterplatte umgesetzt werden kann. Die Platine soll mit Schraub/Klemmverbindern ausgestattet werden, die es ermöglichen, die Verdrahtung bei Bedarf zu trennen, und direkte (gelötete) Verbindungen zur Platine sollen vermieden werden.
Schraubklemmen sind zweifellos die beliebtesten und wirtschaftlichsten Verbinder für diese Zwecke. Es gibt sie mit verschiedenen Abständen: 2,5/2,54 mm, 3,5/3,81 mm, 5,00/5,08 mm und 7,5/7,62 mm, um nur die wichtigsten zu nennen. Um einen Leiterabstand von 2,5 mm einzuhalten, können wir die ersten beiden Modelle sofort ausschließen; und auch beim Raster 5,00/5,08 mm (**Bild 3**) müssen einige Überlegungen angestellt werden.
Der rot markierte Abstand *L* zwischen den beiden Pads beträgt nur etwa 2 mm, was weniger ist als der erforderliche Mindestabstand. Daher kann diese Schraubklemme nicht für einen Netzspannungseingang (230 V_{AC}) verwendet werden, es sei denn, es werden beim Platinenlayout spezielle Lösungen angewendet.
Tatsächlich kann bei begrenztem Platz trotzdem dieser Verbinder verwendet werden, vorausgesetzt, das dielektrische Material der Leiterplatte zwischen den Kontakten wird geändert. Wie? Indem es durch Luft ersetzt wird, wie in **Bild 4** gezeigt. Die Pad-Formen wurden geändert und ein 2 mm breiter Schlitz zwischen die Pads gefräst. Dieser Schlitz muss sich bis zu dem Punkt erstrecken, an dem die Leiterbahnen auf der Leiterplatte den erforderlichen Mindestabstand einhalten.

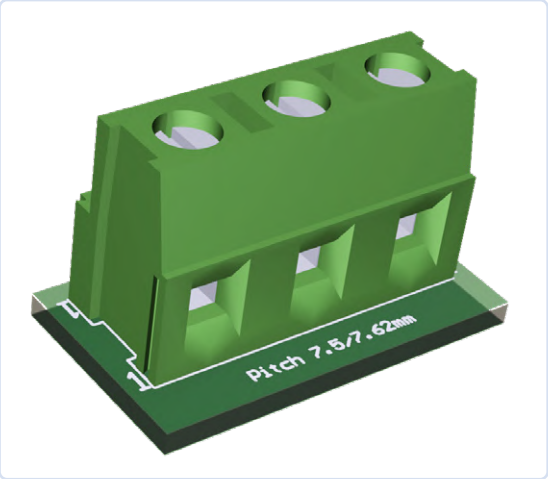


Bild 7. Keine Kompromisse! Eine Schraubklemme im Raster 7,5/7,62 mm erfordert keine besonderen Vorkehrungen und erlaubt auch die Einspeisung höherer Spannungen als 230 V_{AC}.

◀

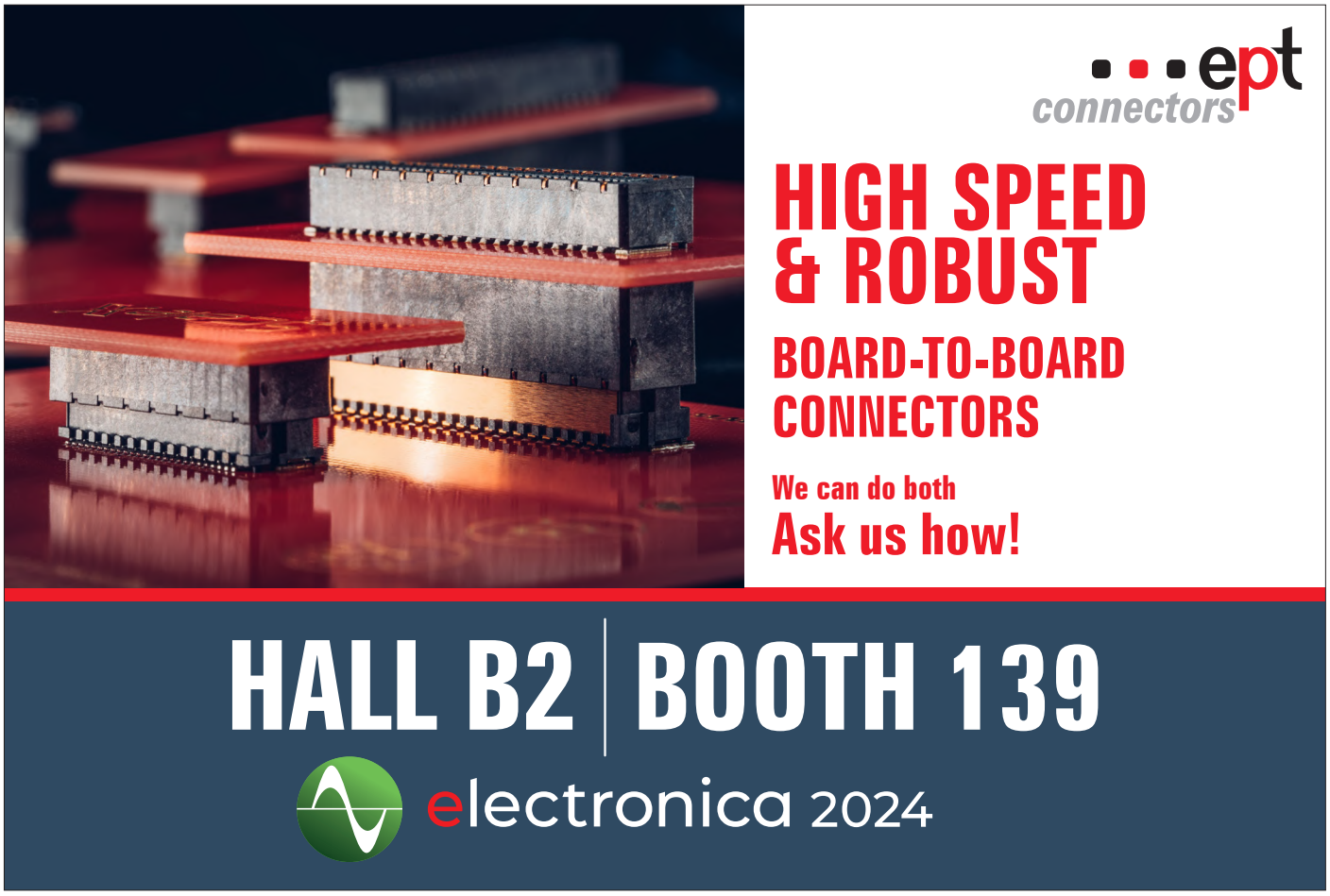
Dies ist jedoch eine (auch teure) Kompromisslösung, die vermieden werden sollte, wenn genügend Platz für größere Verbinder vorhanden ist. Schlitze und Ausschnitte werden auch häufig eingesetzt, um die Isolierung zwischen dem Hochspannungsbereich auf einer Leiterplatte und dem Niederspannungsbereich, einschließlich Leiterbahnflächen, die normalerweise auf Massepotential liegen, weiter zu erhöhen.

Eine weitere praktische Lösung (**Bild 5**) besteht darin, einen dreipoligen 5,00/5,08-Schraub/Klemm-Verbinder zu verwenden, ohne den mittleren Kontakt anzuschließen. In dieser Anwendung ermöglicht der Isolationsabstand $L = L1 + L2$ den Anschluss an die Netzspannung, vorausgesetzt, der mittlere Stift bleibt frei und ist weder an ein Kabel noch an eine Leiterbahn angeschlossen. Auch dies ist als eine Kompromisslösung zu betrachten.

Bild 6 zeigt eine weitere Konfiguration mit einer 3-poligen Schraubklemme mit einem Raster von 5,00/5,08 mm, mit zwei zwischen den Pads gefrästen Schlitzen. Dies ermöglicht den Anschluss an eine Standard-230-V-AC-Netzleitung mit L, N und PE, wobei alle Sicherheitsüberlegungen berücksichtigt werden, die bereits für die vorherigen Fälle gemacht wurden.

Bild 7 schließlich zeigt eine kompromisslose Lösung, bei der eine Schraubklemme im Raster 7,5/7,62 mm verwendet wird. Der Platzbedarf beträgt etwa 16 mm (zweipolig) beziehungsweise 23 mm (dreipolig). Es handelt sich zwar nicht gerade um einen Subminiatur-Verbinder, aber er gehört sicherlich zu den sichersten in Bezug auf Isolierung und Belastbarkeit. Sein weites Raster erlaubt jede Art von Verlegung und ermöglicht die Anwendung an Spannungen, die sogar höher sind als die der Netzspannung.

Faston- oder **AMP-Flachstecker** sind weit verbreitet und werden häufig verwendet. Sie bieten viele positive Eigenschaften wie Kosteneffizienz, Kontaktsicherheit und Vibrationsfestigkeit. Im Gegensatz zu den obigen Klemm-Verindern erfordert ihre Installation auf Leiterplatten



Der Joule-Effekt

In jedem elektrischen Stromkreis, immer wenn ein elektrischer Strom durch einen Leiter fließt, wird ein Teil der elektrischen Energie in andere Energieformen, hauptsächlich Wärme, umgewandelt. Dieses Phänomen betrifft jede Art von Strom, sowohl Gleich- als auch Wechselstrom, und ist als Joule-Effekt oder als Stromwärmegesetz bekannt. Um zu verstehen, warum dies geschieht, muss man den Leiter auf sub-mikroskopischer Ebene betrachten. Ein elektrischer Strom wird durch einen Fluss von Ladungen erzeugt, die sich aufgrund des von einer Spannungsquelle erzeugten elektrischen Feldes gleichmäßig in dieselbe Richtung bewegen. Die freien Elektronen, die durch das elektrische Feld im Leiter bewegt werden, folgen nicht einem völlig linearen Weg, sondern aufgrund der Anwesenheit von Atomen oder Molekülen im kristallinen Gitter des Materials einem ungeraden Pfad. Dabei ändern sie ihre Richtung und geben einen Teil ihrer Energie an die Teilchen ab, mit denen sie kollidieren. Diese absorbieren die von den Elektronen freigesetzte Energie und erhöhen die Schwingungsbewegung um ihre Ruhelage. Diese erhöhte „Unruhe" von Atomen und Molekülen führt zu einem Temperaturanstieg des leitenden Materials. In bestimmten Anwendungen wie bei elektrischen Heizgeräten für Luft oder Wasser oder bei Glühfadenlampen wird dieses Phänomen absichtlich angestrebt, um eine maximale Menge an elektrischer Energie in Wärme umzuwandeln. In elektronischen Schaltungen hingegen muss der Joule-Effekt minimiert werden, um den sicheren Betrieb eines Geräts zu gewährleisten.

ein sorgfältiges Pad-Design und eine ausgezeichnete Lötqualität. Außerdem muss die Platine mechanisch stabil abgestützt werden, weil man beim Aufstecken und Abziehen des Kabelverbinders erhebliche Kraft ausübt. Auch deshalb sollte die Stärke des Platinenmaterials 1,6 mm nicht unterschreiten.

Bild 8a und **Bild 8b** zeigen jeweils die Bestückungs- und die Lötseite einer Musterplatine aus dem Labor des Autors. Im linken Bereich der Bestückungsseite befinden sich die vier Paar Flachstecker, die für Hochspannungsanwendungen geeignet sind. Auf der rechten Seite ist ein weitere Paar für den Niederspannungsanschluss zu sehen. Der Siebdruck zeigt mit einer dicken weißen Linie die Grenze zwischen dem Hochspannungs- und dem Niederspannungsbereich. Allerdings fehlt der Hinweis „Gefahr – Hochspannung" im Aufdruck.

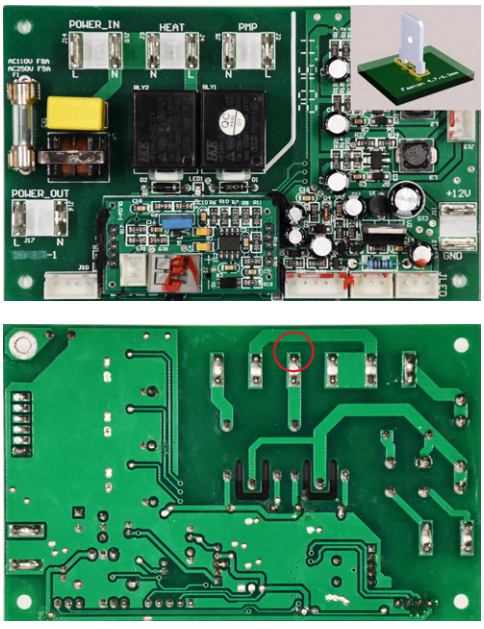


Bild 8. Eine Steuerplatine von der Bauteil- und Lötseite betrachtet. Oben rechts ist der verwendete Faston-Leistungsstecker-Typ abgebildet. Beachten Sie den großen Abstand zwischen den Anschlüssen und die weiße Abgrenzungslinie zwischen den Hochspannungs- und Niederspannungsbereichen. Auf der Lötseite sind die großen Lötstellen auf den Faston-Pads zur mechanischen Verstärkung deutlich zu erkennen, ebenso wie die U-förmigen Isolationsfräsungen in der Nähe der Relais. Beachten Sie den (rot eingekreisten) Mindestabstand von 2,5 mm zwischen N und L. (Quelle: Labor des Autors)

Die Lötseite der Platine zeigt die Faston-Pads, die nicht mit Lötstopplack versehen wurden. Dies vergrößert die Lötfläche und erhöht folglich die mechanische Festigkeit der Verbindung. Der Kontakt- und Leiterbahnabstand ist groß, mit einer (rot umkreisten) Ausnahme, bei der der Abstand zwischen den Leiterbahnen genau 2,5 mm beträgt, das absolute Minimum gemäß dem IPC-2221B-Standard. Eine weitere gute und notwendige Isolationslösung wurde durch die beiden U-förmigen Fräsungen zwischen den Hochspannungsverbindungen der Relais und den jeweiligen Pads, die mit den Niederspannungswicklungen verbunden sind, geschaffen.

Keep cool!

Ein weiterer Sicherheitsaspekt beim Layout einer Platine betrifft die Wärmeableitung. In einem elektrischen oder elektronischen Schaltkreis erwärmen sich alle Leiter infolge des Stromflusses aufgrund eines physikalischen Phänomens, das als **Joule-Effekt** bekannt ist und über den Sie weitere Informationen im nebenstehenden Textkasten finden.

Für ein ordnungsgemäßes thermisches Verhalten muss während des Betriebs die erzeugte Wärme abgeführt und die Schaltung in einem akzeptablen Temperaturbereich gehalten werden. Umgebungstemperatur und Belüftung sind Schlüsselfaktoren und bilden die Grundlage für jede weitere thermische Bewertung in der Entwurfsphase.

Werfen wir einen Blick auf die Registerkarte *Conductor Properties* im PCB Toolkit (**Bild 9**), wo die wichtigsten Parameter eingegeben und die Optionen für unsere Zwecke ausgewählt werden müssen:

- Materialauswahl
- Leiterplattendicke
- Dicke des Basis-Kupferkaschierung
- Dicke der Kupferschicht [6]
- Untere Kupferschicht (ja/nein)

Für die Leiterbahndimensionierung:

- Leiterbahnbreite
- Leiterbahnlänge
- Parallel verbundene Leiterbahnen

Umgebungsparameter:

- Umgebungstemperatur (°C)
- Temperaturanstieg (°C)

Nehmen wir an, wir haben eine 1,6 mm dicke Leiterplatte vom Typ FR4-STD mit einer 18 µ dicken, einseitigen, unplattierten (blanken) Kupferschicht und möchten die thermische Leistung einer 1,27 mm breiten und 25,4 mm langen Leiterbahn bewerten, die einen Strom von 3 A führen soll. Anhand der Ergebnisse, die man erhält, wenn man nach Eingabe der erforderlichen Parameter

auf *Solve* drückt, sehen wir, dass unsere Leiterbahn nach der IPC-2152-Norm [5] einen Nennstrom von 1,991 A (im Menü *Conductor Current*) garantiert, während wir aber 3 A fordern. Der Nennstromwert wird für einen Standard-temperaturanstieg von 20 °C berechnet, der bei einer anfänglichen Umgebungstemperatur von 22 °C zu einer Endtemperatur der Leiterbahn von 22 °C + 20 °C = 42 °C führt.

Durch eine Art Reverse Engineering ermöglicht das Programm eine Simulation der möglichen Endsituation. Angenommen, wir wollten den Strom von 3 A auf unserer Leiterbahn aufrechterhalten — ohne deren elektrische Eigenschaften (Widerstand) zu ändern —, würde durch Klicken auf *Temp Rise* zur einer Erhöhung des Wertes führen, bis der Wert im Feld *Conductor Current* dem Wert von 3 A nahekommt, so dass die Temperaturerhöhung auf 49 °C ansteigt, was zusammen mit der anfänglichen Umgebungstemperatur von 22 °C zu einer Betriebstemperatur von 71 °C führen würde, was für Dauerbetrieb zu hoch wäre.

Und dieser Wert gilt sogar, bevor überhaupt die Wärmeabgabe aller auf der Leiterplatte befindlichen Leistungskomponenten wie Widerstände, Dioden, Leistungshalbleiter, Regler-ICs berücksichtigt werden. Die thermische Gesamtberechnung für eine Leiterplatte erfordert eine komplexe Modellierung, die nicht Gegenstand dieses Artikels ist, aber durchaus Gegenstand eines nächsten sein könnte. Es gibt mehrere mögliche Lösungen für diesen Fall, lassen Sie uns einige davon betrachten.

Vergrößerung der physischen Größe der Leiterbahn: Durch die Vergrößerung der Breite und/oder Dicke der Leiterbahn (durch die Wahl einer Leiterplatte mit einer dickeren Kupferschicht oder einer galvanischen Beschichtung oder beidem) erhöht sich der mögliche Nennstrom erheblich. Allerdings müssen bei einer Verbreiterung der Leiterbahnen immer auch die Isolationsbedingungen (Mindestabstand) zwischen den Leiterbahnen eingehalten werden, und dies ist nicht immer durchführbar.

Vergrößerung der Leiterbahndicke durch Lötzinn: sicherlich eine der praktischsten und kostengünstigsten Lösungen. Sie ermöglicht es, die Strombelastbarkeit der Leiterbahn zu erhöhen, ohne sie zu verbreitern. In **Bild 10** ist ein gutes Beispiel für ein 12-V-Schaltnetzteil zu sehen, bei dem die Leiterbahnen mit hohem Stromfluss sowohl im Nieder- als auch im Hochspannungsbereich mit Zinn verstärkt worden sind.

Äußere Kupferschicht: Bei Leiterplatten mit zwei oder mehr Schichten dient die untere Kupferschicht als Kühlkörper. Sie dient nicht nur als wirksame Abschirmung für die Schaltung, sondern trägt auch zur Wärmeableitung bei, wodurch das thermische Verhalten der Schaltung verbessert wird.

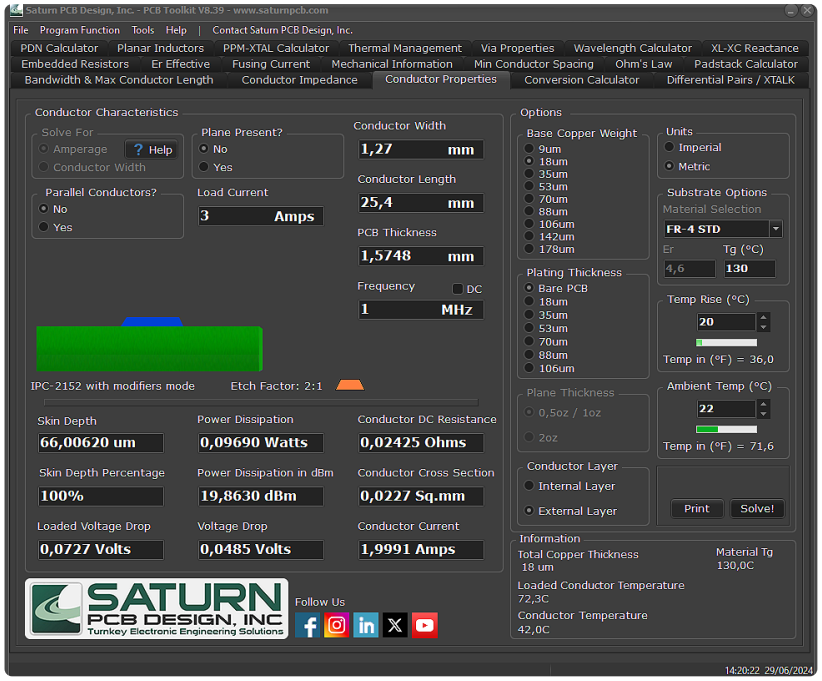


*Bild 9. Das Menü **Conductor Properties** im PCB Tool von Saturn zeigt einen kritischen Fall: eine Leiterbahn, die einen Strom von 3 A führen soll, aber (gemäß IPC-2152-Norm) nur für maximal 1,99 A ausgelegt ist. Hier ist Re-Engineering erforderlich!*

Mehrere Leiterbahnen: Der Strom kann auf zwei oder mehr parallel geschaltete Leiterbahnen verteilt werden, was die Wärmeableitung und damit den möglichen Strom deutlich erhöht. Saturn PCB Design erlaubt es, die Anzahl solcher Leiterbahnen einzustellen und führt entsprechende Berechnungen durch.

Wenn auf dem Leiterplattenlayout ausreichend Platz vorhanden ist, kann die Leiterbahnbreite im Feld *Conductor Width* erhöht werden, bis im Feld *Conductor Current* ein Wert nahe 3 A angezeigt wird. In unserem Fall sind es 2,6 mm, was gemäß den Spezifikationen eine Strombelastbarkeit von 3,03 A ermöglicht.

Bei knappen Platzangebot sind solche einfachen Lösungen jedoch nicht praktikabel. Der Nennstrom von 3 A durch die Leiterbahn kann erreicht werden, indem man eine 18-µm-beschichtete Version der Leiterplatte wählt (18 µm Kupfer mit 18 µm Beschichtung) oder direkt auf eine 35 µm dicke Kupferschicht anstelle der 18-µm-Schicht zurückgreift. Diese Entscheidungen wirken sich erheblich auf die Kosten aus.

Wenn andererseits die gewählte Option darin besteht, die Leiterbahn mit Zinn zu verstärken, muss bedacht werden, dass nach dem Löten der Widerstandswert der Leiterbahn theoretisch nicht mehr ermittelt werden

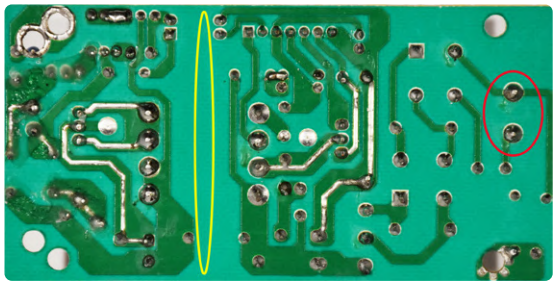


Bild 10. Lötseite einer Platine eines 12-V-Schaltnetzteils. Die mit Zinn verstärkten Leiterbahnen sind gut zu erkennen. Man beachte die 230-V-Netzeinspeisung in einen 7,62-mm-Steckverbinder rechts (rot) und den > 7 mm breiten Isolierbereich (gelb) zwischen dem Nieder- und dem Hochspannungsteil der Schaltung. (Quelle: Labor des Autors)

◀

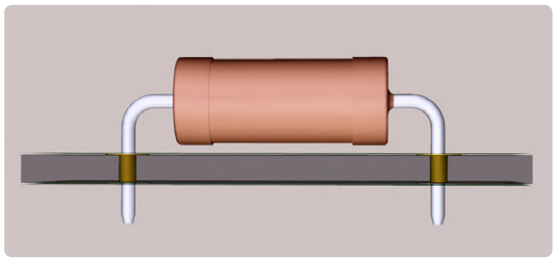


Bild 11. Ein Leistungswiderstand, der ein wenig über der Platinenoberfläche montiert ist. Dadurch wird das Bauteil besser belüftet und auch die thermische Belastung der Leiterplatte verringert.

kann, sondern nur noch in der Praxis durch Messung des individuellen Leiterbahnwiderstands mit einem Milliohmmeter, bevor die Leiterplatte bestückt wird. Diese Lösung kann sinnvoll sein, wenn die Anzahl der für hohe Ströme vorgesehenen Leiterbahnen gering ist, jedoch nicht in anderen Fällen, bei denen dann die Erhöhung der Kupfer- und Beschichtungsdicke sicherlich die professionellste Wahl ist.

Neben der Wärme, die durch den Strom durch die Leiterbahnen erzeugt wird, muss man natürlich auch Komponenten berücksichtigen, die nicht unerhebliche Energiemengen abführen müssen, zum Beispiel Leistungswiderstände und -dioden. Man sollte sich nie darauf verlassen, dass die Leiterplatte durch den Kontakt mit dem Bauteil die erzeugte Wärme teilweise abführt, es sei denn, es wurden spezielle Maßnahmen für diesen Zweck getroffen. In **Bild 11** ist zum Beispiel das Bauteil in einer erhöhten Position relativ zur Platinenoberfläche verlötet. Dies erleichtert die Konvektionskühlung (Luftstrom) und verhindert Belastungen des Leiterplattenmaterials durch Kontakt.

In **Bild 12** ist ein Bauteil im TO-220-Gehäuse liegend auf der Platine befestigt, wobei auf der Lötseite eine kleine Zone zur Wärmeabfuhr vorgesehen ist. Diese Lösung ist sehr praktisch, wenn die Verlustleistung des Bauelements zu hoch für eine vertikale Montage ohne Kühlkörper ist, aber zu niedrig, um die einen speziellen Metallkühlkörper zu rechtfertigen, der den Footprint stark vergrößern würde.

Vor dem Schlusswort

Bevor wir unsere technische Zusammenfassung abschließen, halte ich es für sinnvoll zu erwähnen, dass die IPC-2221B-Norm, auf die sich einige der Beispiele in diesem Artikel bezogen haben, die am wenigsten restriktive in der Branche ist, was die Isolierung angeht, und dass die dort vorgeschriebenen Abstände wirklich nicht verringert werden dürfen. Für kritische Anwendungen wie bestimmte Arten von Haushaltsgeräten oder bei medizinische Geräten gibt es andere, strengere Normen, wie zum Beispiel die IEC 60335, die je nach Ihren Projektanforderungen konsultiert werden sollten/müssen.

Ich möchte Marco Castiglioni, einem talentierten Fachmann für das Routing von Industrieplatinen, danken. Er hat das gesamte 3D-Material vorbereitet und mir als unermüdlicher Berater sehr bei der Erstellung dieses Artikels geholfen.

SE – 230570-02

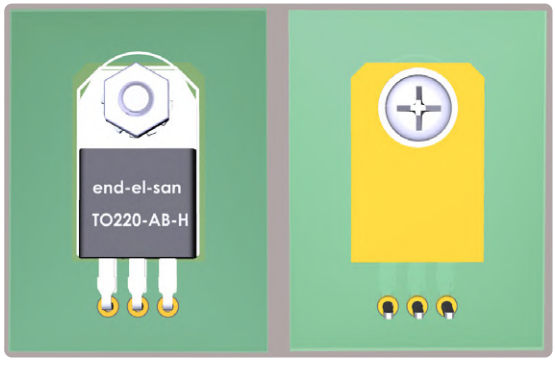
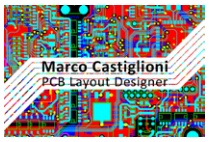


Bild 12. Ein TO-220-Halbleiter, der an der Platine montiert ist, mit einem kleinen Pad zur besseren Wärmeabfuhr auf der Rückseite.

Über Roberto Armani

Roberto Armani ist Elektronikingenieur, der nach seinem Studium am *Politecnico di Milano* über 35 Jahre Erfahrung in verschiedenen Bereichen sammelte. Bevor er dem Elektor-Team als Senior Editor beitrat, arbeitete er in der Computerindustrie, der elektronischen Bildverarbeitung, der Telekommunikation, der Materialprüfung und im Web-Publishing. Neben der Elektronik liebt er klassische Musik zu hören (und zu singen) und hochalpine Wanderungen in den Bergen zu unternehmen.



Über Marco Castiglioni

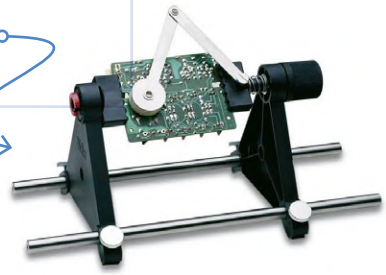
Marco Castiglioni ist ein Ingenieur mit einem Abschluss in Elektronik. Nach seinem Studium begann er als PCB-Layout-Design-Ingenieur bei einem bedeutenden italienischen Unternehmen für professionelle Audiotechnik mit Programmen wie Cadstar, Orcad, Protel, Pcad und Veribest zu arbeiten. 1995 eröffnete er seine eigene Firma und begann mit dem PCB-Routing für Unternehmen aller Bereiche (Audio, Medizin, Industrie, LED-Beleuchtung, Hausautomation und so weiter). Nach 30 Jahren ist er immer noch in dem Markt aktiv, lernt ständig weiter und bleibt über aktuelle Vorschriften und neue Technologien im Bereich der Platinenherstellung auf dem Laufenden. Sie finden ihn auch oft auf verschiedenen Comic- und Film-Conventions am Star-Trek-Stand, gekleidet als Klingone. Als Mensch ist er erreichbar unter: info@masterista.it - www.masterista.it

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Anmerkungen zu diesem Artikel? Kontaktieren Sie bitte Roberto Armani unter roberto.armani@elektor.com, Marco Castiglioni unter info@masterista.it oder die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.

Passende Produkte

- **Whadda WTS100 Löt-Einsteigerset**
  www.elektor.de/20426
- **Weller ESF 120ESD Platinenhalter**
  www.elektor.de/1748



WEBLINKS

[1] Zeitleiste zur Geschichte der gedruckten Schaltungen: https://www.printedcircuits.com/blog/history-of-pcbs/
[2] Inhaltsverzeichnis IPC-Standard für Platinen-Basismaterialien (PDF): https://www.ipc.org/TOC/TOC-IPC-4101E.pdf
[3] Download-Seite des PCB Design Toolkits von Saturn: https://saturnpcb.com/saturn-pcb-toolkit/
[4] Inhaltsverzeichnis IPC-Standard für starre Multilayer-Platinen (PDF): https://www.ipc.org/TOC/IPC-2221B.pdf
[5] Inhaltsverzeichnis IPC-Standard für die Bestimmung der Strombelastbarkeit im Platinendesign (PDF): https://www.ipc.org/TOC/IPC-2152.pdf
[6] Base Copper Weight vs. Plating Thickness: https://t1p.de/ucmms

Opamp-Tester

Für Audio- und andere Anwendungen

Von Alfred Rosenkränzer (Deutschland)

Das Angebot an Operationsverstärkern ist enorm vielfältig. Üblicherweise erfolgt die Vorauswahl für einen bestimmten Zweck zunächst anhand von technischen Daten - zum Beispiel auf den Webseiten von Halbleiter-Distributoren. Bleiben dann mehrere Kandidaten in der engeren Auswahl, muss man unter Umständen selbst weitere Messungen vornehmen, da man nicht immer alle relevanten Parameter unter den geplanten Einsatzbedingungen aus Datenblättern ersehen kann. Genau dafür eignet sich der folgende Tester.

Hat man eine Auswahl möglicher Kandidaten getroffen, bleibt oft nichts anderes übrig, als sich Muster zu bestellen und diese Opamps dann auf Herz und Nieren zu prüfen. Beispielsweise die harmonischen Verzerrungen sind vom Eingangspegel, der Verstärkung, dem Ausgangspegel, der Last sowie der Frequenz abhängig. In Datenblättern finden sich diese Werte oft nur für bestimmte Parameter, die nicht alle Einsatzfälle abdecken und zudem zwischen Herstellern nicht immer wirklich vergleichbar sind. Um die notwendigen Tests verschiedener Opamps unter gleichen Randbedingungen durchführen zu können, wurde die folgende kleine Testplatine entwickelt. Mit Hilfe dieses Testers kann man zudem ICs leicht auf Gleichheit auswählen oder aber die besten Exemplare herausfinden.

Prinzip

Die Einfachheit der Schaltung erübrigt ein Blockschaltbild. Die Schaltung von **Bild 1** zeigt zwei Dual-Opamps im DIL-Gehäuse. Die Beschaltung von IC1 ist für den nichtinvertierenden und die von IC2 für den invertierenden Betrieb ausgelegt. Die Eingänge von IC1A und IC1B werden mit Hilfe von R1 beziehungsweise R6 auf eine definierte Eingangsimpedanz von rund 50 kΩ gebracht, da die nichtinvertierenden Eingänge der beiden Opamps ja hochohmig sind. R3 ist bei IC1A nicht bestückt. Aus diesem Grund beträgt hier die Verstärkung +1. Bei IC1B hingegen hat die Verstärkung aufgrund des Verhältnisses von (R8 + R9) / R8 einen Wert von +10. Die jeweiligen Verstärkungen können aber leicht durch andere Werte oder Bestückung von R3 an eigene Bedürfnisse angepasst werden.

Bei IC2A beträgt die Verstärkung aufgrund des Verhältnisses von R12 / R13 genau -1. Die Werte von R16 und R17 führen bei IC2B zu einer Verstärkung von -10. Man bekommt in dieser Testschaltung also mit zwei Dual-Opamps vier Testschaltungen mit invertierender und nichtinvertierender und einfacher und zehnfacher Verstärkung. Die in der Schaltung von Bild 1 angegebenen Werte eignen sich für typische Audioanwendungen. Zu beachten ist bei den invertierenden Beschaltungen, dass hier die Eingänge mit etwa 3 kΩ bei IC2A und rund 1 kΩ bei IC2B deutlich niederohmiger ausfallen als bei IC1A und IC1B.

Jeder Opamp-Ausgang ist an jeweils zwei Steckverbinder angeschlossen. An die zweipoligen Steckverbinder wird über einen 220-Ω-Widerstand das Messgerät angeschlossen. Diese Serienwiederstände sollen Überschwingen bei kapazitiven Lasten (zum Beispiel durch die typische Kapazität von ≥30 pF am Eingang eines Oszilloskops) verhindern. Der konkrete Wert ist unkritisch und sollte im Bereich von 50…1.000 Ω liegen - im Wesentlichen soll er das Schwingen des Opamp bei kapazitiven Lasten verhindern. An die vierpoligen Steckverbindungen können

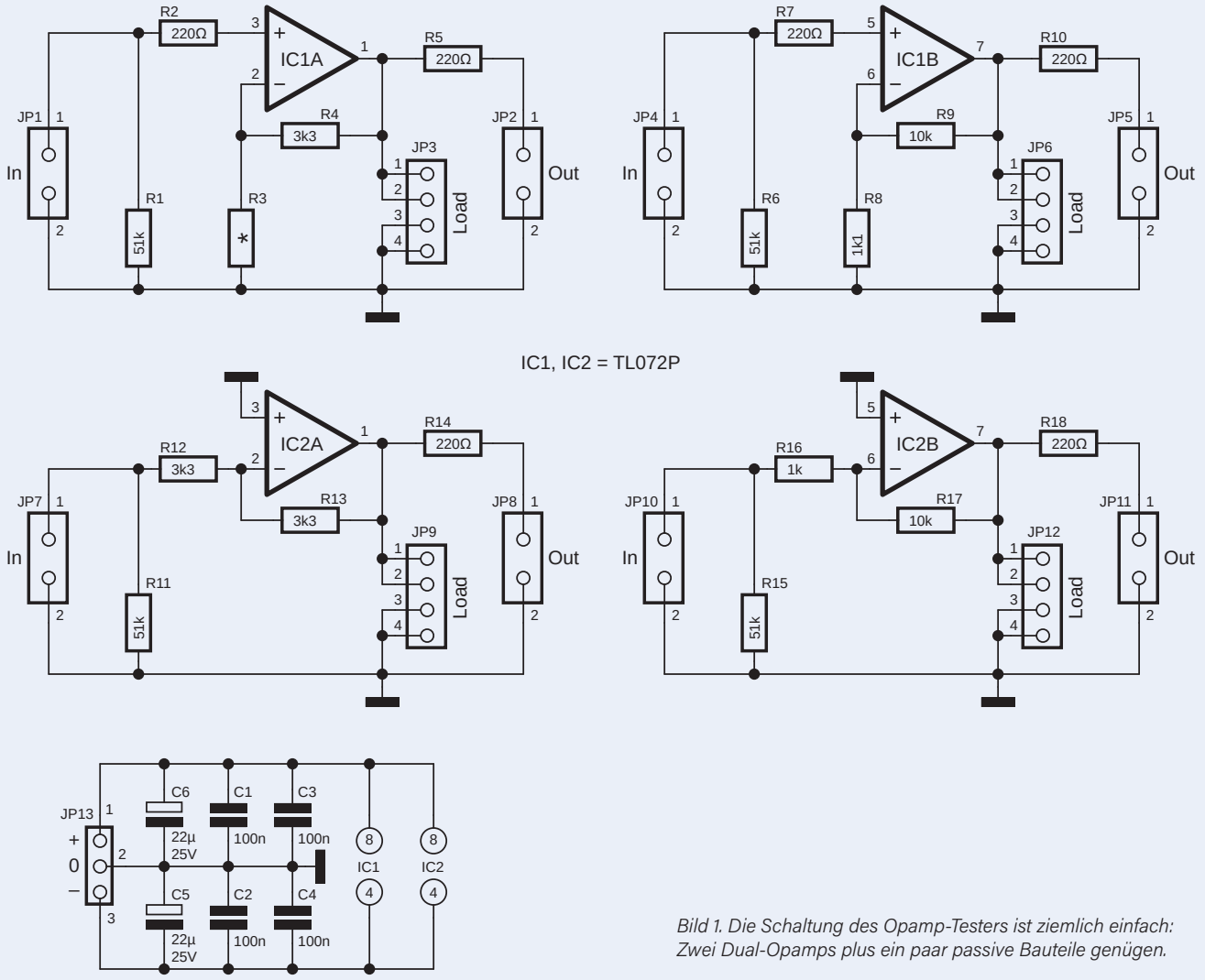


Bild 1. Die Schaltung des Opamp-Testers ist ziemlich einfach: Zwei Dual-Opamps plus ein paar passive Bauteile genügen.

Lasten gesteckt werden, womit unterschiedliche Betriebsbedingungen generiert werden können. Damit ist die Schaltung ausreichend beschrieben.

Außerdem

Die Spannungsversorgung erfolgt symmetrisch via JP13. Zwei Elkos und je zwei 100-nF-Kondensatoren pro IC dienen der Entkopplung. Es wurde bewusst auf Spannungsregler verzichtet, damit man das Verhalten der Opamps bei verschiedenen Versorgungsspannungen überprüfen kann.
Die Layout-Dateien meiner Platine können von der Elektor-Webseite zu diesem Artikel [4] heruntergeladen werden (**Bild 2**). Für die Opamps sind hochwertige „gedrehte" DIL-Sockel vorgesehen, damit sich verschiedene ICs schnell und lötfrei wechseln lassen. Für ICs in SMD-Ausführung braucht es sogenannte BoBs (**B**reak**o**ut **B**oards), die man selbst anfertigt oder kauft. **Bild 3** zeigt eine bestückte

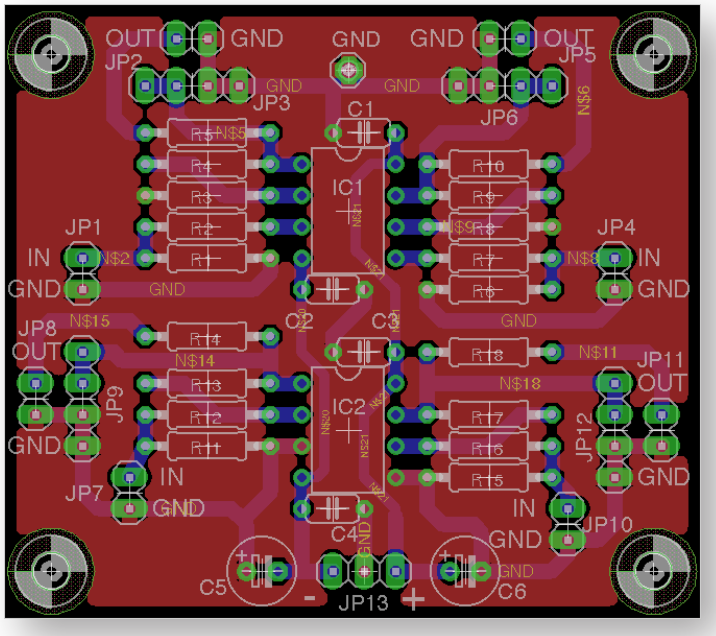


Bild 2. Die Layout-Dateien der Platine können von der Elektor-Webseite zu diesem Artikel [4] heruntergeladen werden.

Platine mit solchen SMD-BoBs. Bei meinen Experimenten konnte ich keinen messbaren Einfluss dieser Adapterplatinchen feststellen. Will man Opamps für Audioanwendungen testen, empfiehlt sich ein möglichst rauscharmer Aufbau. Alle Widerstände müssen daher Metallfilm-Ausführungen sein. Bild 3 zeigt rechts unten eine gesteckte Last in Form eines auf eine vierpolige SIL-Buchsenleiste gelöteten Widerstands. Man kann so leicht unterschiedliche steckbare Lasten realisieren, die mit unterschiedlichen Widerständern und/oder Kapazitäten bestückt sind.

Zum Messen von kleinen Verzerrungen braucht man entsprechenden Messgeräte. Von mir sind im Laufe der Jahre schon viele Artikel zum Thema Messtechnik in Elektor erschienen [1]. Mein Review des QA403 der Firma QuantAsylum beschreibt einen interessanten Audio-Analyzer [2]. Weiter bieten bestimmte Filter die Option, den Messbereich Richtung kleinster Verzerrungen zu erweitern. Ein Beispiel ist unter [3] zu finden. .

230210-02

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Haben Sie Fragen oder Anmerkungen zu diesem Artikel?
Schicken Sie eine E-Mail an den Autor unter alfred_rosenkraenzer@gmx.de oder kontaktieren Sie Elektor unter redaktion@elektor.de.

Über den Autor

Alfred Rosenkränzer arbeitete viele Jahre als Entwicklungsingenieur, zu Anfang im Bereich der professionellen Fernsehtechnik. Seit Ende der 1990er Jahre entwickelt er digitale High-Speed-und Analogschaltungen für IC-Tester. Das Thema Audio ist sein privates Steckenpferd.

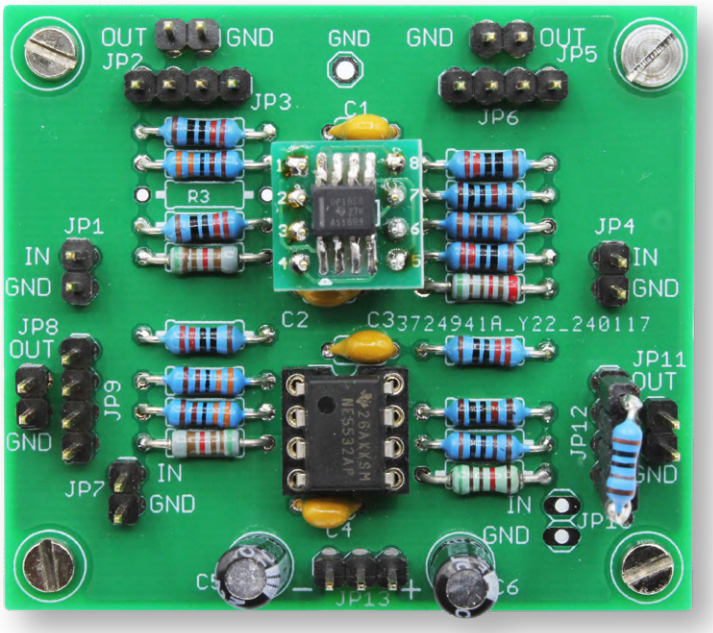


Bild 3. Die bestückte Platine mit IC1 im SOIC8-Gehäuse auf einer Adapterplatine. IC2 ist als „große" DIL-Version ausgeführt. An Ausgang JP12 ist eine Last gesteckt.

Stückliste

Widerstände:
1% Metallfilm, bedrahtet
R1, R6, R11, R15 = 10k
R2, R5, R7, R10, R14, R18 = 4k7
R3 = entfällt*
R4, R12, R13 = 3k3
R8 = 1k1
R9, R17 = 10k
R16 = 1k

Kondensatoren:
C1..C4 = 100 n, Folie, RM 2/10"
C5, C6 = 22 µ/25 V, Elko, RM 1/10"

Halbleiter:
IC1, IC2 = TL072, Dual-Opamp*

Außerdem:
4 IC-Fassungen, 8-pol., gedrehte Kontakte
JP1, JP2, JP4, JP5, JP7, JP8, JP10, JP11 = 2-pol. Stiftleiste, RM 1/10"
JP3, JP6, JP9, JP12 = 4-pol. Stiftleiste, RM 1/10"
JP13 = 3-pol. Stiftleiste, RM 1/10"
Passende 4-pol. Buchsenleisten für Lasten*
Platine 230210-02*

* siehe Text

Passende Produkte

- **QuantAsylum QA403 24-bit Audio Analyzer**
  www.elektor.de/20530
- **Siglent SDG1032X 2-Kanal-Signalgenerator (30 MHz)**
  www.elektor.de/20276
- **PeakTech 1404 2-Kanal Oszilloskop (100 MHz)**
  www.elektor.de/20229

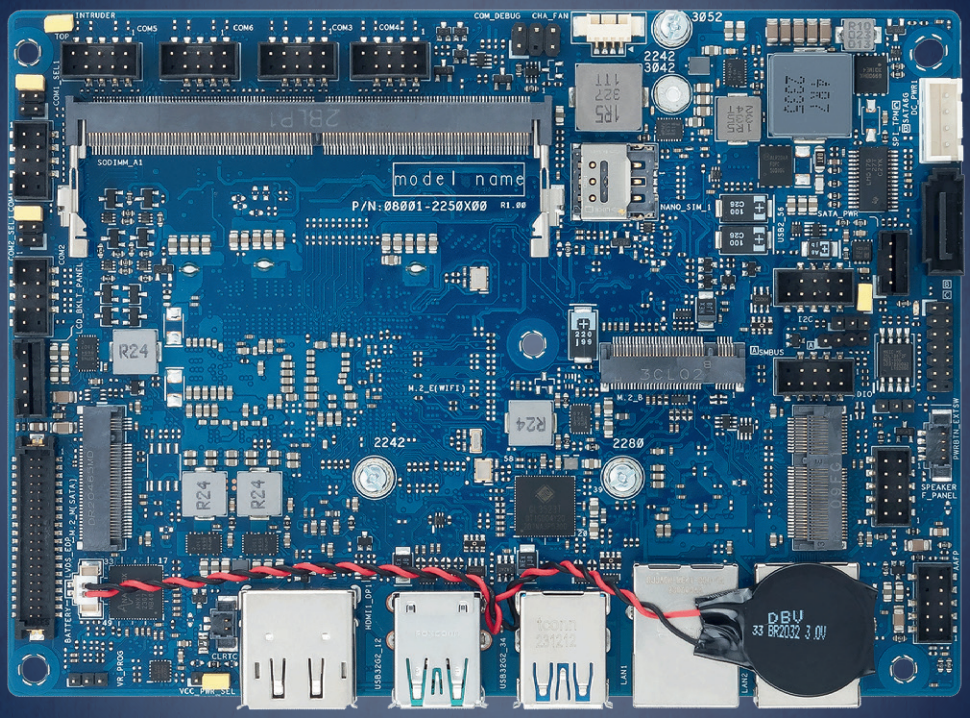
WEBLINKS

[1] Messtechnik-Beiträge von Alfred Rosenkränzer: https://tinyurl.com/4mp59rke
[2] A. Rosenkränzer, „Comparing the QuantAsylum QA403 to the Gold Standard", 2023: https://tinyurl.com/yudmy5sk
[3] A. Rosenkränzer, „Aktives 1-kHz-Filter für Verzerrungsmessungen", Elektor 5/2023 : https://tinyurl.com/ye3amnkp
[4] Artikel-Webseite: https://www.elektormagazine.de/230210-02

ASUS IoT Amston Lake SBC

Mit **Intel® Deep Learning Boost** ermöglicht der SBC eine bis zu **6x schnellere KI-Verarbeitung**, ideal für komplexe Aufgaben wie hochentwickeltes maschinelles Lernen und Bildverarbeitung.

Der Asus IoT Amston Lake SBC basiert auf der **Intel® Atom™ x7000RE Serie** und verdoppelt die Anzahl der Kerne, **ohne den Energiebedarf zu erhöhen.**



Der SBC bietet bis zu **16 GB DDR5-RAM** mit **In-Band ECC**, was für maximale Leistung und **minimale Fehleranfälligkeit** bei Edge-Computing-Anwendungen sorgt.

Entwickelt für Temperaturen von **-20°C bis +70°C** und mit einem sehr weiten **Eingangs-Spannungsbereich** von **9-36V**, ist das Board ideal für raue Industriebedingungen.

FORTEC INTEGRATED

Interesse geweckt?

Projekt-Update #4
Energiemessgerät mit ESP32

Energieüberwachung mit MQTT

Von Saad Imtiaz (Elektor)

Bisher haben wir uns mit der Einrichtung des ESP32-Energiemessgeräts und dessen Integration in den Home Assistant beschäftigt und auch das zukünftige Potenzial des ESP32-S3-Chips für KI- und ML-Funktionen diskutiert, um Energieverbrauchsmuster vorherzusagen und Verbraucher zu identifizieren. In diesem Update führen wir eine Firmware ein, die eine Echtzeit-Energieüberwachung über MQTT ermöglicht und den Weg für zukünftige Funktionen ebnet.

Die Reise des ESP32-Energiemessgeräts vom Labortisch zum Sicherungskasten führte uns vom Zusammenbau der Komponenten, der Einrichtung des Energiemessgeräts mit ESPHome und dem Home Assistant, über die Kalibrierung und Prüfung bis zum Einbau in den Sicherungskasten. Im letzten Projekt-Update [1] legten wir mit der Integration in Home Assistant den Grundstein, um KI- und ML-Funktionen hinzufügen zu können, um Energieverbrauchsmuster vorherzusagen und Geräte anhand ihrer Energiesignaturen zu identifizieren.

Zugegeben, die KI/ML-Integration ist wegen der umfangreichen Datenaufbereitung noch im Gange, aber mit diesem kleinen Update erreichen wir eine entscheidende Zwischenstufe: die Echtzeit-Energieüberwachung mit MQTT. MQTT ist ein leichtgewichtiges Messaging-Protokoll, das für eine effiziente Kommunikation entwickelt wurde. Einige Grundzüge des Protokolls finden Sie im Textkasten **Was ist MQTT?**.

Benutzerdefinierte Firmware und MQTT

In diesem Artikel besprechen wir die nächste Phase des Projekts, die Nutzung von MQTT und der Arduino-IDE, um die Energieüberwachung in Echtzeit zu ermöglichen. Dieses Update deckt die Firmware-Entwicklung ab, die es dem ESP32 ermöglicht, mit einem MQTT-Broker zu kommunizieren und Energiedaten an einen Home-Assistant-Server oder eine andere MQTT-kompatible Plattform zu senden.

Der Vorteil von MQTT mit einer individuellen Firmware gegenüber ESPHome ist, dass diese individuelle Firmware eine viel größere Flexibilität in Bezug auf Integration und Anpassung bietet. Mit einer benutzerdefinierten Firmware haben Sie die volle Kontrolle darüber, wie

Was ist MQTT?

MQTT ist ein leichtgewichtiges Nachrichtenprotokoll für die effiziente Kommunikation zwischen Geräten, insbesondere in IoT-Umgebungen. Das Herzstück dieses Systems ist der MQTT-Broker, ein Server, der als Drehscheibe für den Nachrichtenaustausch dient. Der Broker empfängt Nachrichten von Geräten, den so genannten Publishern, und leitet sie auf der Grundlage eines Systems von Topics an die entsprechenden Subscriber weiter.

Ein Topic (Thema) in MQTT ist eine Zeichenfolge, die Nachrichten kategorisiert und als Kanal fungiert, in dem Informationen veröffentlicht werden, während ein Subscriber (Abonnent) ein Gerät oder eine Anwendung ist, das/die auf bestimmte Topics hört, um diese Nachrichten zu empfangen. In einer Smart-Home-Einrichtung könnte beispielsweise ein Topic wie `home/energy/voltage` Spannungsmesswerte übertragen, und ein Dashboard, das dieses Topic abonniert, würde diese Messwerte in Echtzeit empfangen und anzeigen.

Der Broker sorgt dafür, dass die Nachrichten effizient und sicher zugestellt werden, auch über unzuverlässige Netze. In IoT-Anwendungen ist der MQTT-Broker für die Verwaltung des Datenaustauschs zwischen Sensoren, Geräten und Systemen (den MQTT-Clients) von entscheidender Bedeutung und ermöglicht die Überwachung, Steuerung und Automatisierung in Echtzeit.

Listing 1: Die Firmware (Auszug)

```
#include <WiFi.h>
#include <SPI.h>
#include <ATM90E32.h>
#include <MQTTPubSubClient.h>
#include <config.ino> // Include configuration file for WiFi and MQTT details

// WiFi Credentials
const char* ssid = WIFISSID;       // Your WiFi SSID
const char* pass = WIFIPASSWORD;   // Your WiFi Password

WiFiClient client;
MQTTPubSubClient mqtt;

ATM90E32 energymeter{};

void setup() {

...

  /* Initialize the ATM90E32 energy meter with the specified parameters */
  energymeter.begin(CS_PIN, LINEFREQ, PGA_GAIN, VOLTAGE_GAIN, GAIN_CT_A, GAIN_CT_B, GAIN_CT_C);

...

  /* Begin the WiFi connection using the provided SSID and password */
  WiFi.begin(ssid, pass);

  /* Initialize the MQTT client */
  mqtt.begin(client);

  /* Connect to WiFi, MQTT broker, and Home Assistant */
  connect();

...
 }

void loop() {
  /* Keep the MQTT client updated */
  mqtt.update();

  /* Reconnect to the MQTT broker if the connection is lost */
  if (!mqtt.isConnected()) {
    connect();
  }

  /* Check and send energy data to Home Assistant every 3 seconds */
  static uint32_t prev_ms = millis();
  if (millis() > prev_ms + 3000) {
    prev_ms = millis();
    getEnergyData(); // Retrieve energy data and send via MQTT
  }
}

void getEnergyData() {

  // Retrieve system status from the ATM90E32
  unsigned short sys0 = energymeter.GetSysStatus0();   //EMMState0
  unsigned short sys1 = energymeter.GetSysStatus1();   //EMMState1
  unsigned short en0 = energymeter.GetMeterStatus0();  //EMMIntState0
  unsigned short en1 = energymeter.GetMeterStatus1();  //EMMIntState1

  // Print system and meter status for debugging
  Serial.println("Sys Status: S0:0x" + String(sys0, HEX) + " S1:0x" + String(sys1, HEX));
  Serial.println("Meter Status: E0:0x" + String(en0, HEX) + " E1:0x" + String(en1, HEX));
  delay(10);

  // Check if the MCU is not receiving data from the energy meter
  if (sys0 == 65535 || sys0 == 0) Serial.println("Error: Not receiving data
                                                  from energy meter - check your connections");

  // Retrieve all parameters from the ATM90E32
  float lineVoltageA = energymeter.GetLineVoltageA();
  float lineVoltageB = energymeter.GetLineVoltageB();
  float lineVoltageC = energymeter.GetLineVoltageC();
       ...

  // Send all the collected energy data via MQTT to Home Assistant
  mqtt.publish("esp32energymeter/lineCurrentA", String(lineCurrentA).c_str());
  mqtt.publish("esp32energymeter/lineCurrentB", String(lineCurrentB).c_str());
  mqtt.publish("esp32energymeter/lineCurrentC", String(lineCurrentC).c_str());
  mqtt.publish("esp32energymeter/totalCurrent", String(totalCurrent).c_str());

...
}
```

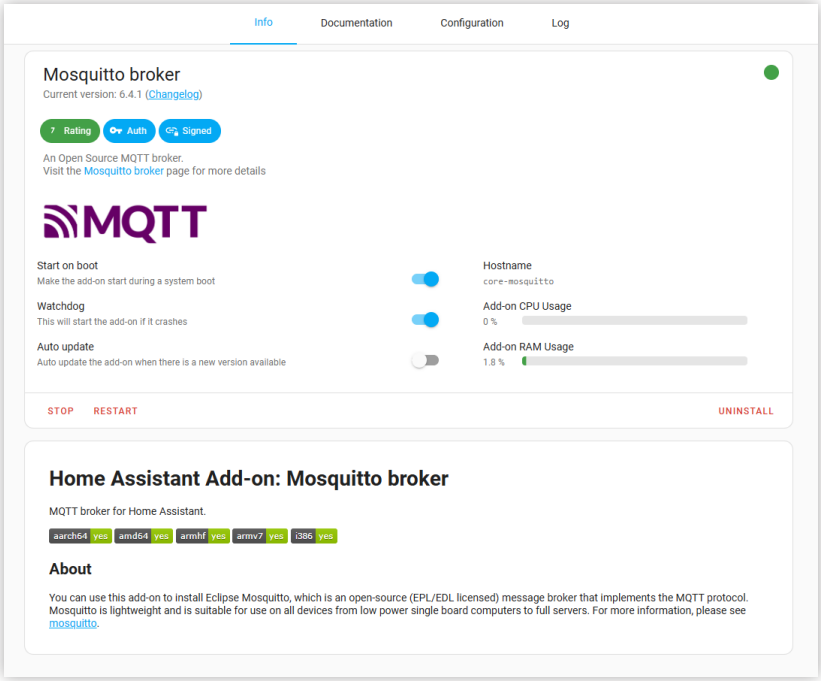


Bild 1. Konfigurationsoptionen für den MQTT-Broker im Home Assistant, einschließlich der Option ***Start on Boot****, die einen automatischen Start auslöst.*

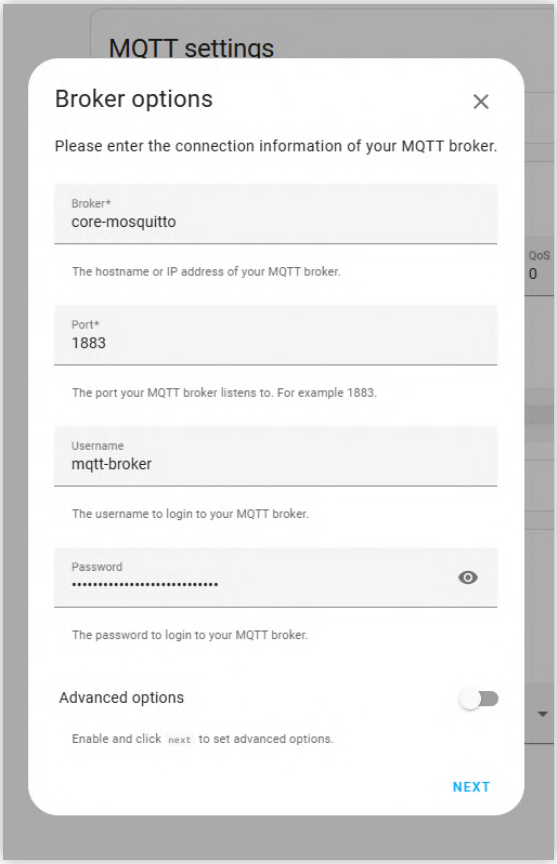


Bild 2. Einrichten der MQTT-Integration in Home Assistant mit IP-Adresse, Port und Anmeldeinformationen des Benutzers.

die Daten erfasst, verarbeitet und übertragen werden, so dass Sie das System an die spezifischen Projektanforderungen anpassen können. Dieses Maß an Kontrolle ist besonders vorteilhaft für komplexe Anwendungen, bei denen Sie die Leistung optimieren, nicht standardisierte Hardware integrieren oder erweiterte Funktionen wie KI und maschinelle Lernalgorithmen implementieren wollen. Darüber hinaus ermöglicht die benutzerdefinierte Firmware eine einfachere Integration in eine Vielzahl von Plattformen, die über den Home Assistant hinausgehen, etwa Cloud-basierte Dienste, benutzerdefinierte Dashboards oder andere IoT-Systeme. Sie können auch detailliertere Sicherheitsmaßnahmen implementieren, zum Beispiel benutzerdefinierte Verschlüsselungsprotokolle oder erweiterte Authentifizierungsmechanismen, damit Ihre Daten im gesamten Netzwerk sicher sind. Darüber hinaus kann eine solche Firmware für bestimmte Anwendungsfälle optimiert werden, um Überflüssiges zu eliminieren und so die Systemeffizienz zu verbessern, was besonders in Umgebungen mit eingeschränkten Ressourcen wichtig ist.

Die Software

Die Firmware wurde geschrieben, um den ESP32 mit einem WLAN zu verbinden und MQTT für die Kommunikation zu nutzen, so dass die Energiedaten zu Überwachungs- und Automatisierungszwecken an einen Home-Assistant-Server gesendet werden können. In **Listing 1** ist ein Auszug des Codes zu sehen. Der gesamte Code und alle Hardware-Dateien finden Sie auf dem GitHub-Repository dieses Projekts [2].

Das Projekt stützt sich auf zwei wichtige Bibliotheken: die Bibliothek *ATM90E32* von CircuitSetup [3] wickelt die Kommunikation mit dem Energiemess-IC ab, und die Bibliothek *MQTTPubSubClient* [4], die die Kommunikation als MQTT-Client verwaltet. Die *ATM90E32*-Bibliothek ist für das Sammeln von Daten Spannung, Strom und Leistung vom Energiezählerchip unerlässlich. Während des Entwicklungsprozesses stellte die Integration von MQTT mit Benutzername und Passwort eine große Herausforderung dar. Während viele MQTT-Bibliotheken solch grundlegende Aufgaben bewältigen können, zeichnete sich *MQTTPubSubClient* als eine der wenigen Bibliotheken aus, die mit dem ESP32 kompatibel war und die notwendigen Authentifizierungsfunktionen unterstützte. In der Software werden zunächst die notwendigen Bibliotheken für die Netzwerkkonnektivität, die SPI-Kommunikation, die Verbindung mit dem Energiezähler-IC und die Verwaltung der MQTT-Kommunikation eingebunden. Die Konfigurationsdetails für WLAN und MQTT werden in einer separaten Konfigurationsdatei gespeichert. Die `setup()`-Funktion initialisiert die serielle Schnittstelle für das Debugging, richtet den ATM90E32-Energiezähler mit den angegebenen Parametern ein und stellt die Verbindungen zum WLAN und zum MQTT-Broker her. Dies sorgt dann für eine sichere die Kommunikation des ESP32 mit Home Assistant und anderen MQTT-kompatiblen Plattformen.

In der Hauptschleife `loop()` wird der MQTT-Client ständig aktualisiert, um die Verbindung mit dem Broker aufrechtzuerhalten. Wenn die Verbindung zu irgendeinem Zeitpunkt unterbrochen wird, versucht der Code automatisch, die Verbindung wiederherzustellen. Außerdem ruft die Software die Energiedaten vom ATM90E32-Chip ab und sendet sie an den MQTT-Broker. Auf diese Weise kann der Home Assistant den Energieverbrauch nahezu

Home Assistant: Definieren von MQTT-Daten als Sensoren

Um die von Ihrem ESP32-Energiemessgerät über MQTT gesendeten Daten zu überwachen, müssen Sie diese Datenpunkte als Sensoren in Home Assistant definieren:

Öffnen der Konfigurationsdatei

Öffnen Sie Ihre Home-Assistant-Konfigurationsdatei (*configuration.yaml*) mit dem Datei- oder einem beliebigen Texteditor.

Definieren der MQTT-Sensoren

Fügen Sie in der Datei *configuration.yaml* die folgende Konfiguration hinzu, um Ihre MQTT-Sensoren zu definieren:

```
mqtt:
  sensor:
    - name: Line Voltage A
      unique_id: esp32_voltage_a
      state_topic: "esp32energymeter/lineVoltageA"
      unit_of_measurement: "V"

    - name: Line Current A
      unique_id: esp32_current_a
      state_topic: "esp32energymeter/lineCurrentA"
      unit_of_measurement: "A"
```

Anpassung der Sensoren

Ersetzen Sie `Line Voltage A`, `Line Current A` und so weiter durch Ihnen genehme Namen. Sorgen Sie dafür, dass das `state_topic` mit dem Thema übereinstimmt, das in Ihrer ESP32-Firmware für die Veröffentlichung der Daten verwendet wird. Die `unique_id` sollte jeden Sensor eindeutig bezeichnen, damit der Home Assistant dies richtig verfolgen und verwalten kann.

Speichern und Neustart des Home Assistant

Nachdem Sie die Sensor-Definitionen hinzugefügt haben, speichern Sie die Datei *configuration.yaml* und starten Sie Home Assistant neu, so dass die Änderungen übernommen werden.

Erfreuen Sie sich der Sensor-Anzeige

Nach dem Neustart von Home Assistant sollten Ihre MQTT-Sensoren im Dashboard angezeigt werden. Jetzt können Sie die Energiedaten in Echtzeit überwachen!

in Echtzeit überwachen und wertvolle Erkenntnisse für die Hausautomatisierung liefern.

Die Funktion `getEnergyData()` erfasst die verschiedenen Energiemesswerte vom ATM90E32-Chip wie Netzspannung, Strom, Leistung (Wirk-, Blind- und Scheinleistung), Leistungsfaktor, Phasenwinkel, Frequenz und Temperatur. Die gesammelten Daten werden dann in spezifischen MQTT-Topics veröffentlicht, so dass sie für die Überwachung und Analyse im Home Assistant zugänglich sind. Entwickler und Benutzer können die Energiedaten auch auf dem seriellen Monitor ausgeben, wenn sie Debugging aktivieren, was eine einfache Fehlersuche und Validierung der Daten ermöglicht.

Die Funktion `connect()` sorgt dafür, dass der ESP32 eine stabile Verbindung zum Netzwerk und zum MQTT-Broker aufrechterhält. Diese Funktion kümmert sich um die Wiederherstellung einer unterbrochenen WLAN- oder MQTT-Verbindung. Debugging-Meldungen geben in Echtzeit Auskunft über den Verbindungsstatus, und eine LED zeigt erfolgreiche Verbindungen an.

Einrichten eines MQTT-Brokers im Home Assistant

Damit das ESP32-Energiemessgerät das MQTT-Protokoll zum Senden der Energiemesswerte verwenden kann, müssen Sie zunächst einen MQTT-Broker einrichten. Ein MQTT-Broker kann auf fast jedem Computer eingerichtet werden, der mit Ihrem Heimnetzwerk verbunden ist. Er kann auf Ihrem PC mit einem Docker-Containers konfiguriert, direkt auf einem Raspberry Pi installiert oder sogar auf einem Cloud-Server für den Fernzugriff gehostet werden. Um die Dinge jedoch einfach zu halten und eine nahtlose Integration in Ihre Smart Home-Einrichtung zu ermöglichen, werden wir es hier im Home Assistant einrichten.

Um das MQTT-Add-on im Home Assistant zu installieren, rufen Sie zunächst Ihr Home-Assistant-Dashboard auf, indem Sie zu der URL navigieren, unter der Ihre Instanz läuft. Gehen Sie in der Seitenleiste auf *Settings*, dann auf *Add-ons* und öffnen Sie den *Add-on Store*. Wenn Sie *MQTT* suchen und den offiziellen Mosquitto-Broker in den Ergebnissen finden, klicken Sie darauf und wählen

Bild 3. Testen der MQTT-Verbindung durch Abonnieren aller Themen, damit die Nachrichten von Home Assistant empfangen werden.

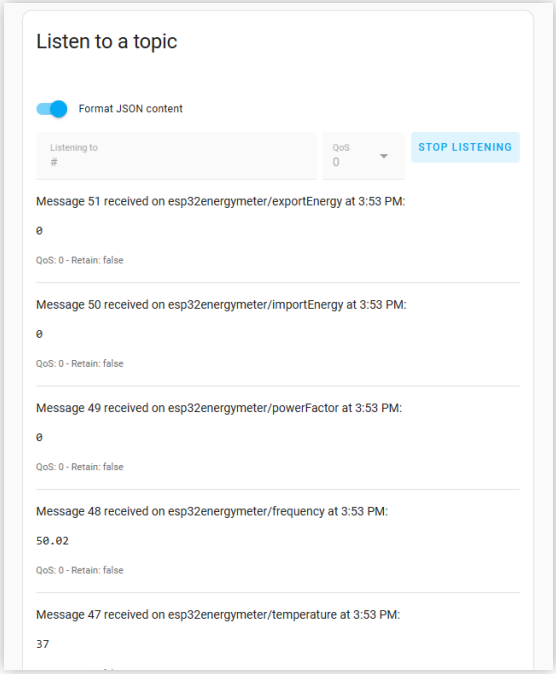
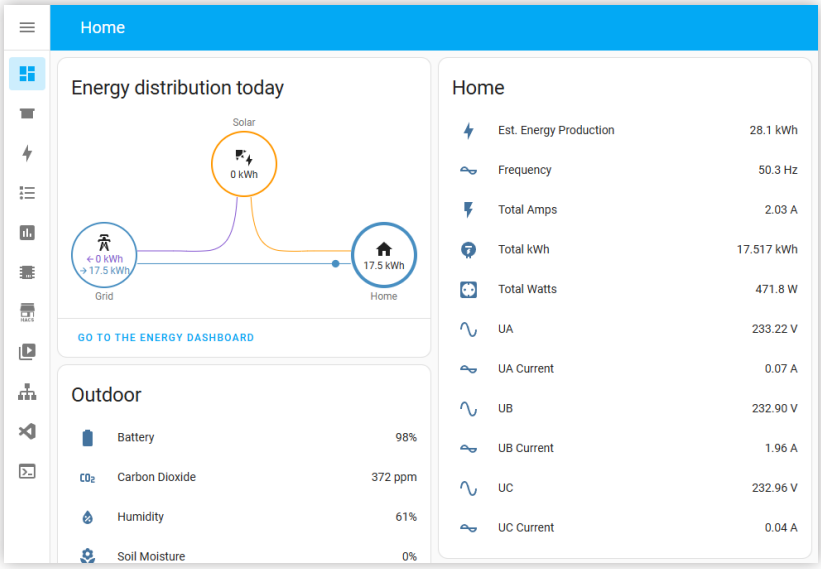


Bild 4. Benutzerdefiniertes Dashboard in Home Assistant, das die Echtzeit-Energiedaten des ESP32-Energiemessgeräts anzeigt.



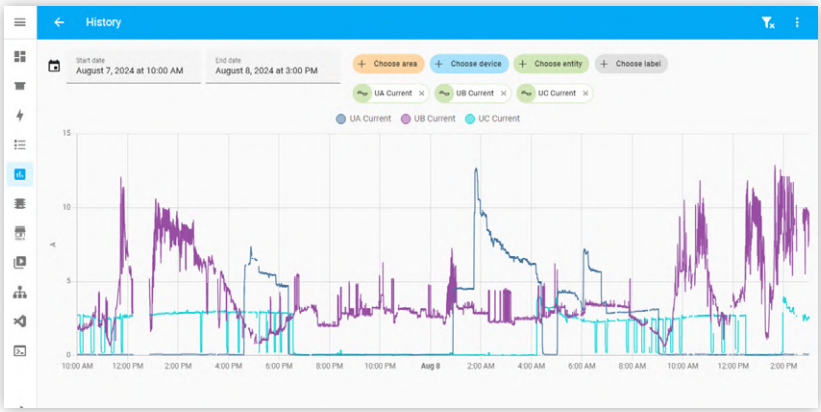


Bild 5. Beispiel für in Home Assistant erstellte Verlaufs-Diagramme zur Überwachung des Energieaufnahme.

Sie dann *Install*. Die Installation kann einige Augenblicke dauern, aber dann können Sie den MQTT-Broker konfigurieren, indem Sie die Konfigurationsoptionen bearbeiten. In der Regel sind die Standardeinstellungen ausreichend, aber Sie können und sollten einen bestimmten Benutzernamen und ein Kennwort festlegen. Klicken Sie nach der Konfiguration auf die Schaltfläche *Start*, um den MQTT-Broker zu aktivieren, und aktivieren Sie *Start on boot option*, damit er bei jedem Neustart von Home Assistant automatisch gestartet wird (siehe **Bild 1**).

Als Nächstes müssen Sie die MQTT-Integration in Home Assistant konfigurieren. Gehen Sie zu *Settings*, dann *Devices & Services* und wählen Sie *Integrations*. Klicken Sie auf *Add Integration*, suchen Sie nach *MQTT*, und wählen Sie es aus. Home Assistant erkennt automatisch den laufenden MQTT-Broker. Wenn Sie dazu aufgefordert werden, konfigurieren Sie die MQTT-Einstellungen wie etwa die IP-Adresse des Brokers - normalerweise *localhost*, wenn er auf demselben Gerät wie Home Assistant läuft, aber Sie können auch *core-mosquito* mit demselben Ergebnis eingeben. Behalten Sie für den Port den Standardwert *1833* bei, und kontrollieren Sie, ob es sich beim Benutzernamen und beim Kennwort um die Anmeldedaten eines aktuellen Benutzers in Home Assistant handelt, wie in **Bild 2** gezeigt. Sie können in diesem Fall auch einen separaten Benutzer in Home Assistant nur für MQTT einrichten.

Jetzt können Sie kontrollieren, ob Home Assistant so eingerichtet ist, dass er Nachrichten von Ihrem ESP32-Energiemessgerät empfangen kann. Abonnieren Sie dazu ein Topic „#“, um alle an Ihren MQTT-Broker gesendeten Nachrichten zu empfangen, wie in **Bild 3** gezeigt. Sie können auf diese Seite zugreifen, indem Sie im Menüpunkt MQTT-Integration auf *Configure in Integration entities* klicken.

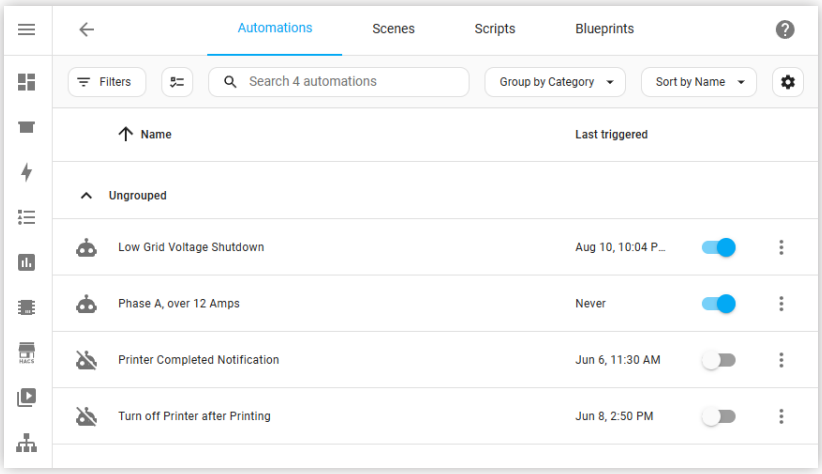
Wenn der MQTT-Broker auf Home Assistant läuft, können Sie nun Ihr ESP32-Energiemessgerät anschließen. In der Datei *config.ino* Ihrer ESP32-Firmware setzen Sie die `HOMEASSISTANT_IP` auf die IP-Adresse Ihrer Home-Assistant-Instanz. Konfigurieren Sie dann `DEVICE_NAME`, `USER_ID` und `PASSWORD`, wenn Sie die Authentifizierung auf dem MQTT-Broker eingerichtet haben. Danach können Sie den ESP32 mit der Firmware flashen und kontrollieren, ob er sich erfolgreich mit dem MQTT-Broker verbindet. Sobald die Verbindung hergestellt ist, beginnt das ESP32-Energiemessgerät mit der Veröffentlichung von Energiedaten an den MQTT-Broker, die Sie im Home Assistant überwachen können, indem Sie sich bei den entsprechenden MQTT-Topics anmelden.

Um Energiedaten in Home Assistant anzuzeigen, werden die MQTT-Entitäten automatisch für jedes Topic erstellt, das Ihr ESP32-Energiemessgerät veröffentlicht. Falls nicht, was manchmal vorkommen kann, müssen Sie die MQTT-Entitäten in der Datei *configurations.yaml* in Home Assistant definieren. Sie können den Anweisungen folgen, die unter **Definieren von MQTT-Daten als Sensoren** erwähnt werden.

Danach finden Sie die Sensorentitäten im Home Assistant unter *Settings*, *Devices & Services* und *Entities*. Verwenden Sie diese Entitäten, um in Home Assistant benutzerdefinierte Dashboards zu erstellen, mit denen Sie Energiedaten in Echtzeit anzeigen, Diagramme erstellen und Warnmeldungen auf der Grundlage von Verbrauchsschwellenwerten einrichten können (siehe **Bild 4** und **Bild 5**). Mit MQTT und Home Assistant können Sie auch Aktionen auf der Grundlage von Energiedaten automatisieren (siehe **Bild 6**), mit anderen intelligenten Geräten integrieren und wertvolle Einblicke in den Energieverbrauch Ihres Hauses gewinnen.

Einsteigern empfehle ich die Lektüre des *Getting Started Guide* von Home Assistant [5], der eine umfassende Einführung in die Einrichtung und Verwendung von Home Assistant bietet. Außerdem finden Sie in der Dokumentation zur MQTT-Integration von Home Assistant [6][7] detaillierte Hinweise zur Konfiguration von MQTT und zur effektiven Integration Ihrer Geräte. Diese Ressourcen helfen Ihnen, Home Assistant und MQTT in Betrieb zu nehmen und Ihre Smart Home-Einrichtung effizienter und benutzerfreundlicher zu gestalten.

RG – 240349-02



▲ *Bild 6. Automatisierte Aktionen in Home Assistant, basierend auf den Energiedaten des ESP32-Energiemessgeräts, die über MQTT empfangen werden.*

THEMENFOKUS
Besuchen Sie unsere Webseite **Leistungselektronik und Energie** für mehr Artikel, Projekte, Nachrichten und Videos.
www.elektormagazine.de/strom-energie

Über den Autor

Saad Imtiaz, Senior Engineer bei Elektor, ist Mechatronik-Ingenieur mit einer umfassenden Erfahrung in eingebetteten Systemen und Produktentwicklung. In seinem Berufsleben hat er mit einer Vielzahl von Unternehmen zusammengearbeitet, vom innovativen Start-up bis hin zum etablierten Weltkonzern, und zukunftsweisende Prototyping- und Entwicklungsprojekte vorangetrieben. Mit seinem umfangreichen Hintergrund, der eine Tätigkeit in der Luftfahrtindustrie und die Leitung eines Technologie-Startups umfasst, bringt Saad eine einzigartige Mischung aus technischem Fachwissen und Unternehmergeist in seine Rolle bei Elektor ein. Hier trägt er zur Projektentwicklung sowohl im Bereich Software als auch Hardware bei.

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Wenden Sie sich bitte an den Autor unter saad.imtiaz@elektor.com oder an die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.

Passende Produkte

- **Home Assistant Green**
  www.elektor.de/20725
- **Raspberry Pi 5 (2 GB RAM)**
  www.elektor.de/20951

WEBLINKS

[1] Saad Imtiaz, „Projekt-Update #3: Energiemessgerät mit ESP32“, Elektor 7-8/2024: https://elektormagazine.de/240244-02
[2] Github-Repository ESP32 Energy Meter: https://github.com/ElektorLabs/esp32-energymeter
[3] Arduino-Bibliothek ATM90E32 von CircuitSetup: https://github.com/CircuitSetup/ATM90E32
[4] Bibliothek MQTTPubSubClient von hideakitai: https://github.com/hideakitai/MQTTPubSubClient
[5] Einführung in Home Assistant: https://www.home-assistant.io/getting-started/
[6] MQTT-Integration in Home Assistant: https://www.home-assistant.io/integrations/mqtt/
[7] MQTT-Sensor in Home Assistant: https://www.home-assistant.io/integrations/sensor.mqtt/

Echtzeit-Spektrumanalyzer mit Waveguide-Technologie und Multi-Schnittstellen-PCs

Aaronia etabliert neues Produktsegment und präsentiert erste Prototypen auf der electronica in München

▲ *Bild 1. Der SPECTRAN® V6 PLUS XPR 250XB-WR12 bietet 10 dB NF bei 77 GHz. Damit ist er die perfekte Wahl für Radarmessungen im Automobilbereich (76 GHz bis 81 GHz).*

Ein Beitrag von Aaronia AG

Es ist wieder so weit, die Welt der Elektronik trifft sich auf der *electronica* in München. Vom 12...15. November machen über 2.500 Aussteller die Weltleitmesse zum wichtigsten Impulsgeber der internationalen Elektronikbranche. In diesem Jahr zeigt die Aaronia AG aus Strickscheid nicht nur die aktuellen Entwicklungen ihrer Echtzeit-Spektrumanalyzer der SPECTRAN®-Serie oder des Aartos-Drohnendetektionssystems. Vielmehr überrascht der Weltmarktführer aus Deutschland mit dem Einstieg in das PC-Geschäft und präsentiert die Prototypen künftiger Aaronia-eigenen PC-Boards.

Echtzeit-Spektrumanalyzer (Real-Time Spectrum Analyzers, RTSA) sind unverzichtbare Werkzeuge in der modernen Funktechnik. Die stetig wachsende Komplexität von HF-Signalen, getrieben durch technologische Fortschritte wie 5G, IoT und Satellitenkommunikation, erfordert präzise und effiziente Messverfahren. 5G, Wi-Fi 6 und ultrabreitbandige Kommunikationssysteme (UWB) nutzen komplexe Modulationsverfahren und hohe Bandbreiten.

Gewappnet für IEEE 802.11ax

Echtzeit-Spektrumanalyzer bieten hier entscheidende Vorteile, da sie HF-Signale zeitgleich erfassen und analysieren können. Speziell die Echtzeit-Spektrumanalyzer der SPECTRAN®-V6-Serie von Aaronia ermöglichen die kontinuierliche und somit lückenlose Datenerfassung ohne Informationen über kurze oder intermittierende Signale zu verlieren. Dies ermöglicht die Erkennung, Charakterisierung und gegebenenfalls Dekodierung sporadischer oder transienter Ereignisse, die in der modernen Kommunikationstechnologie eine wesentliche Rolle spielen. Die einmal aufgezeichneten Daten stehen dem Nutzer vollumfänglich auf dem eingesetzten PC zur Verfügung, beispielsweise um die Kanalbelegung zu optimieren, einzelne Geräte zu lokalisieren oder Repeater-Standorte zu ermitteln.

Messungen im EHF-Band

5G nutzt eine breite Palette an Frequenzbändern, die eine wesentlich höhere Frequenz als frühere Mobilfunk-

Die Erhöhung der Anzahl verfügbarer USB-Schnittstellen war einer der Gründe für unseren Einstieg in die Entwicklung von PC-Bords. Hier stoßen alle herkömmlichen Geräte schnell an ihre Grenzen.

standards aufweisen, wie etwa das extrem hochfrequente Band von 30 GHz bis 300 GHz (EHF). Die Analyse solcher Hochfrequenzsignale erfordert Spektrumanalysatoren, die eine hohe Frequenzauflösung sowie ausreichend hohe Bandbreite bieten, um die komplexe Struktur der Signale darzustellen. Zudem nutzen 5G-Systeme Beamforming-Techniken und Massive-MIMO (Multiple Input Multiple Output), was die Analyse weiter verkompliziert. Hierfür sowie für Messungen im Mobilfunk-Umfeld liefert Aaronia den SPECTRAN® V6 5G. Das Gerät unterstützt auch die WiGig 45 GHz (802.11aj) und 60 GHz (802.11ad/aj/ay) Profile, die jetzt in der neuesten Version der RTSA Suite PRO zur Signalaufzeichnung und Datenanalyse enthalten sind.

Bezahlbare Lösung für Automotive-Anwendungen

Mit einer Echtzeitbandbreite von bis zu 490 MHz und einer Sweepgeschwindigkeit von 3 THz/s ist der SPECTRAN® V6 Xplorer die neue Referenz in punkto Geschwindigkeit. Ausgestattet mit Waveguide-Anschlüssen erlaubt der Analyzer Messungen im Millimeterwellen-Bereich, die mit herkömmlichen Kabeln nicht möglich sind. Waveguides übertragen das Signal ohne Verzerrungen und Verluste. Sie sind weniger anfällig für äußere Störungen wie elektromagnetische Interferenzen, was in einer Umgebung mit vielen elektrischen Geräten und Funksignalen wichtig ist. Dadurch bleibt das Signal sauber, und die Messungen des Spektrumanalyzers werden nicht verfälscht.

Der neue SPECTRAN® V6 Xplorer ist eine effiziente und vor allem bezahlbare Lösung beispielsweise zur Wartung und Überprüfung moderner Sicherheits-Sensoren die den Abstand zwischen Fahrzeugen ermitteln, Totwinkel-Assistenten sowie teilweise auch zur Justierung von Einparkhilfen. Derartige Sensoren ermitteln die Entfernung zu Objekten, indem sie elektromagnetische Wellen aussenden und die Zeit messen, bis die Reflektionen wieder zurückzukommen. Diese Wellen bewegen sich sehr schnell, fast mit Lichtgeschwindigkeit. Die Autowerkstätten sind in der Regel mit der Wartung solcher Sensoren überfordert. Es ist ihnen kaum zuzumuten, Equipment im Wert mehrerer hunderttausend Euro anzuschaffen. Technische Überwachungsvereine etwa könnten sich aber ein SPECTRAN® V6-basierendes System anschaffen und diese Sensoren somit bei der Fahrzeugkontrolle mit überprüfen.

Mit den SPECTRAN® V6-Echtzeit-Spektrumanalyzern mit Waveguide-Technik lassen sich diese hochfrequenten und schnell wechselnden Signale sicher analysieren sowie auswerten. Durch den Waveguide-Anschluss können an die Echtzeit-Spektrumanalyzer der Aaronia AG, mit den künftig verfügbaren Waveguides, den jeweiligen Anforderungen entsprechend eigene Verstärker- und Splittersysteme angebunden werden. Damit stellt Aaronia bezahlbare Lösungen für derartige Anwendungen bereit.

Einstieg in den PC-Markt

Die Datenanalyse ist die eine Seite, die zur Verfügung stehende Rechenleistung die andere. Obgleich bereits mit Standard-Computern über die Aaronia Echtzeit-Spektrumanalyzer in Verbindung mit der RTSA-Suite PRO eine sehr effiziente Verarbeitung selbst von IQ-Daten möglich ist, steigen vielfach die Anforderungen an Bandbreite und Verarbeitungsgeschwindigkeit. „Wir sind ständig auf der Suche nach Computersystemen, die unseren Ansprüchen an Geschwindigkeit, Speicherkapazitäten sowie Schnittstellen genügen“, führt Thorsten Chmielus, CEO der Aaronia AG, aus. „Dementsprechend

Bild 2. Thorsten Chmielus, CEO Aaronia AG.

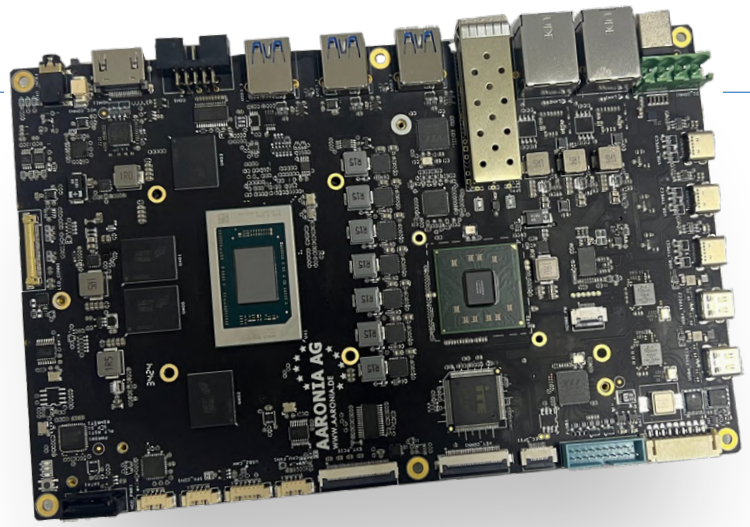


Bild 3. Die auf modernsten Intel®- oder AMD® Prozessoren basierenden PC-Boards sind wahre I/O-Multitalente und erlauben beispielsweise die gleichzeitige Nutzung von vier SPECTRAN® V6 ECO-Analysatoren (4× USB PD).

haben wir beschlossen, die erforderliche Hardware selbst zu entwickeln und freuen uns, die ersten Ergebnisse jetzt erstmals präsentieren zu können". Die auf modernsten Intel®- oder AMD® Prozessoren basierenden PC-Boards sind wahre I/O-Multitalente und erlauben beispielsweise die gleichzeitige Nutzung von vier SPECTRAN® V6 ECO-Analysatoren (4× USB PD).

Mit dem SPECTRAN® V6 MOBILE zeigt Aaronia den weltweit ersten portablen Echtzeit-Spektrumanalyzer mit einer RTBW von 490 MHz. Hiermit können selbst die 320 MHz breiten Kanäle des neuen IEEE 802.11ax-Standards vollständig erfasst werden. Mit einem Frequenzbereich von 9 kHz bis zu 140 GHz und der Sweep-Geschwindigkeit von 3 THz/s sind die zum Einsatz kommenden Aaronia-Spektrumanalyzer für alle Aufgaben gerüstet. Angetrieben wird das Tablet durch Prozessoren der neuesten Generation. Hier steht wahlweise eine Variante auf Basis des Intel Ultra 985H oder AMD® Ryzon 7949 HF zur Auswahl. Der integrierte 16-Bit-Single-Chip-Sampling-Analog-Digital-Wandler (ADC) besitzt eine Konvertierungsrate von bis zu 2 Gigasample pro Sekunde (GSPS).

Außergewöhnlich ist unter anderem die Ausstattung mit acht USB-Schnittstellen, von denen vier PD-fähig sind. USB-Power-Delivery (USB PD) ist ein USB-Erweiterungsstandard, der den Empfang von bis zu 100 W über ein USB-C-Kabel ermöglicht. In der Regel verfügen PC-basierte Systeme über maximal zwei USB-PD-Ports. Hierzu Chmielus: „Die Erhöhung der Anzahl verfügbarer USB-Schnittstellen war einer der Gründe für unseren Einstieg in die Entwicklung von PC-Bords. In der Messtechnik müssen immer mehr Peripheriegeräte per USB an die Echtzeit-Spektrumanalyzer angeschlossen werden. Da stoßen alle herkömmlichen Geräte schnell an ihre Grenzen und unter anderem aufgrund von Laufzeitverzögerungen verbietet sich der Einsatz von USB-Erweiterungen. Darüber hinaus werden USB-Devices zunehmend über den USB-Port mit Strom versorgt, was das Vorhandensein einer größeren Anzahl an USB-PD-Schnittstellen erforderlich macht."

Ein robustes Aluminiumgehäuse für den Outdoor-Einsatz schützt Elektronik sowie Display. Auch bei den neuen SPECTRAN® V6-Tablets bleibt Aaronia ihrer Philosophie treu, für jede Anwendung die passende Lösung anzubieten. So kann der Kunde entweder eine vorkonfigurierte Version erwerben oder sich das Gerät nach seinen Anforderungen entsprechend zusammenstellen.

240571-02

Die Aaronia AG zeigt ihre neusten Produkte und Entwicklungen auf der

electronica 2024
München - 12...15. November
Halle A3 - Stand 516
www.aaronia.com

Über die Aaronia AG

Die Aaronia AG ist ein Technologie-Unternehmen mit Sitz in Strickscheid in der Eifel. 2003 von Thorsten Chmielus gegründet produziert das Unternehmen hauptsächlich Spektrum-Analysatoren auf Basis patentierter Spektrum-Analyse-Prozesse. Von der Konzeptionierung über das Design bis zur finalen Bestückung sowie der Softwareentwicklung findet alles in Deutschland statt. High Tech made in Germany. 2004 wurde der erste Spektrum-Analyzer produziert und ausgeliefert. 2008 wurde mit der V4-Serie die nächste Generation der Spektrum-Analyzer präsentiert, die einen Weltrekord in Handheld Empfindlichkeit von DANL -170dBm (Hz) aufstellte. Seit 2020 ist die 6. Generation der SPECTRAN Echtzeit-Analyzer auf dem Markt.

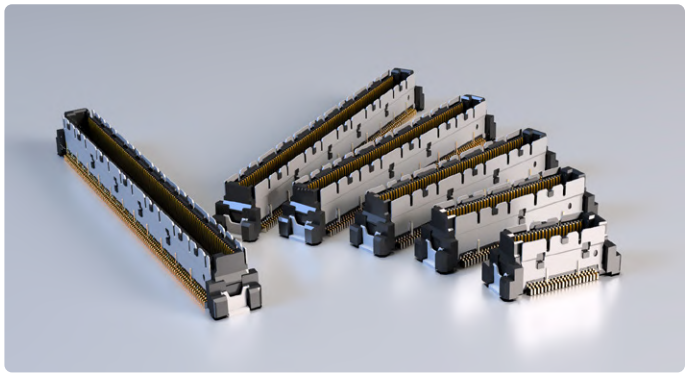
Mit der neuen Generation der Spektrum-Analysatoren legt AARONIA die Messlatte in Sachen Geschwindigkeit ganz hoch. Durch Kaskadierung mehrerer SPECTRAN-Geräte lassen sich Echtzeitbandbreiten im Gigahertz-Bereich realisieren. Damit setzt die SPECTRAN® V6-Serie neue Benchmarks in der USB-Kompaktklasse. Das System kommt weltweit in zahlreichen Einzelinstallationen sowie komplexen Anlagen zum Einsatz.

Die Aaronia AG entwickelt, vertreibt und handelt mit Messgeräten, Technologien und Rechten auf dem Gebiet der Nieder- und Hochfrequenz-Messtechnik, der Robotik, sowie der Abschirmung von nieder- und hochfrequenten Feldern jeglicher Art. Darüber hinaus betreibt das Unternehmen Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Nachrichten- und Messtechnik und konzipiert eigene Schaltkreis- und Messverfahren insbesondere für die Entwicklung extrem empfindlicher sowie genauer Hochfrequenz-Messtechnik.

electronica 2024

Highspeed und robuste Board-to-Board Steckverbinder

Ein Beitrag von ept

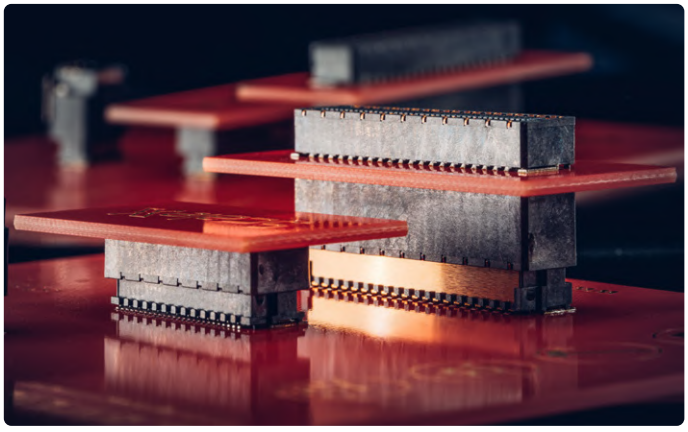


Auf der electronica in München (12.–15. November) präsentieren wir sowohl unser umfangreiches Produktportfolio an Highspeed fähigen und robusten Board-to-Board Steckverbindern, als auch unsere Neuentwicklung im Bereich Hybridsteckverbinder.
Mit unseren Highspeed fähigen und robusten Board-to-Board-Steckverbindern erhalten Sie die Freiheit, Ihre Board-to-Board-Lösungen zu erweitern. Somit bieten wir für sämtliche Anwendungsfälle die passende Leiterplattensteckverbindung. Das breite Anwendungsfeld reicht von Leiterplatten-Steckverbindern für Schlagbohrmaschinen bis hin zu Board-to-Board-Steckverbindern für High-Performance-Computer.
Um den heutigen Anforderungen des Marktes gerecht zu werden und auch anspruchsvollste Highspeed-Anwendungen zu ermöglichen, bietet ept mit dem Colibri 25 Gbit/s einen PCI-Express-Gen4-kompatiblen und darüber hinaus miniaturisierten Highspeed-Steckverbinder mit einem Raster von nur 0,5 mm.
Der Colibri 25 Gbit/s ist für einen Leiterplattenabstand von 5 mm oder 8 mm verfügbar. Plug und Receptacle bietet ept in den Polzahlen 40, 80, 120, 160 und 220 an – eine 440-polige Version, bestehend aus zwei Plugs beziehungsweise Receptacles mit je 220 Pins, wird in einem Bestückrahmen zusammengehalten.
Er wird dabei in verschiedenen Anwendungsfeldern verbaut, beispielsweise in der industriellen Automatisierung, bei POS-Systemen, in der Medizintechnik, Messtechnik und im Gaming sowie im Bereich der Transportation und Gebäudetechnik.
Außerdem stellen wir den neuen Hybridsteckverbinder HYMC, entwickelt mit Rosenberger, für moderne E/E-Architekturen vor. Moderne Fahrzeug-E/E-Architekturen nutzen sowohl Highspeed-Datensteckverbindungen für differenzielle Datenübertagung, zum Beispiel für Automotive-Ethernet und auch klassische Signal- und Powersteckverbinder, beispielsweise für CAN- oder LIN-Bus.
Die ept-Rosenberger-Kooperation integriert beide Typen in kombinierten Hybridsteckverbindern. Für den Anschluss eines Hybridsteckverbinders zur Leiterplatte kommt wahlweise die herkömmliche Löttechnik oder die vorteilhafte Einpresstechnik zum Einsatz.
Beide Unternehmen gehören zu den führenden Anbietern in ihren Bereichen: Das breite Rosenberger-Steckverbinderprogramm, zu dem unter anderem die Baureihen H-MTD®, MTD®, HFM® und FAKRA zählen, ist weltweit bekannt für seine Highspeed-Datenübertragung bei Automotive-Anwendungen wie Ethernet für ADAS oder Infotainment.
ept hat sich mit ihrer Tcom®-Einpresszone einen Namen im Bereich der kundenspezifischen Schnittstellensteckverbinder für Automotive-ECUs gemacht, vor allem bei kritischen Anwendungen wie zum Beispiel Airbag, ABS/ESP oder Motorsteuerungen.
Für mehr Informationen besuchen Sie uns in Halle B2, Stand 139.

240600-02

Über ept

Das mittelständische Unternehmen ept wurde 1973 von Bernhard Guglhör in Buching (Ostallgäu) gegründet. Die Unternehmensname ept steht für **e**lektronische **P**räzisions**t**echnik und unterstreicht damit den an sich selbst gestellten hohen Qualitätsanspruch. Die ept GmbH entwickelt und fertigt ein breites Spektrum an Steckverbindern für den Automotive- und Industrial & Communications-Sektor.



WÜRTH ELEKTRONIK
MORE THAN YOU EXPECT

Induktivitäten

Spulen und Ferrite anwendungsorientiert selektieren

Von Dr. Heinz Zenkner (Würth Elektronik eiSos)

Sie wollen die passende Induktivität für Ihre Anwendung finden? Dieser Artikel zeigt exemplarisch die Unterschiede von drei induktiven SMT-Bauelementen: Keramik-Induktivität, SMT-Ferrit und drahtbewickelte Ferrit-Induktivität. Aufgrund ihrer elektrischen Eigenschaften sind sie für unterschiedliche Anwendungen prädestiniert, und ihre physikalisch bedingten parasitären Eigenschaften lassen sich schaltungstechnisch geschickt ausnutzen.

Induktive Bauelemente existieren in einer Vielzahl von Ausführungen. Insbesondere SMT-Versionen erfreuen sich großer Beliebtheit, da sie sich einfach auf Platinen bestücken lassen. Allerdings ist zu beachten, dass Induktivität nicht gleich Induktivität ist. Dies wird anhand von drei Vertretern von SMT-Induktivitäten in diesem Artikel verdeutlicht: Keramik-Induktivität, SMT-Ferrit und drahtbewickelte Ferrit-Induktivität. **Bild 1** zeigt die Impedanzkurven der drei Induktivitäts-Typen im Vergleich:

- SMT-Ferrit: WE-CBF [1]:
- SMT-Induktivität mit Keramikkern („Luftspule“): WE-KI [2]:
- Drahtwindungen auf Ferritkern („drahtbewickelter Ferrit“): WE-RFI [3]

Die Komponenten wurden so gewählt, dass sie im Bereich unter ihren Impedanzmaxima einen ähnlichen Impedanzverlauf aufweisen. Die Unterschiede der Impedanzen zeigen sich im Bereich der Maxima. Der SMT-Ferrit hat sein Maximum bei der niedrigsten Frequenz, der drahtbewickelte Ferrit bei der höchsten. Die Keramikinduktivität hat im Bereich des Impedanzmaximums den steilsten Anstieg und Abfall und somit die höchste Güte Q.

Vergleich der elektrischen Parameter

In **Bild 2** sind die elektrischen Parameter der Induktivitäten gegenübergestellt. Bei Induktivitäten ohne Ferritkern (WE-KI), wird in Datenblättern die Induktivität als Wert angegeben, hier 560 nH. Der Induktivitätswert ist zwar auf eine Messfrequenz bezogen, jedoch ist der Wert unterhalb der Resonanzfrequenz über der Frequenz nahezu konstant (siehe Datenblatt).
Genau betrachtet ist der Blindwiderstand der Induktivität nicht ganz linear ansteigend mit der Frequenz. Es gibt zwei Effekte, die die Impedanz der Luftspule erhöhen: die Erhöhung des Blindwiderstandes aufgrund der Lenz'schen Regel und die Erhöhung des Widerstandes durch den Skin-Effekt.
In der rein induktiven Schaltung ist die Spule direkt an die Versorgungswechselspannung angeschlossen. Da die Spannung mit der Frequenz ansteigt und abfällt, steigt und fällt auch die

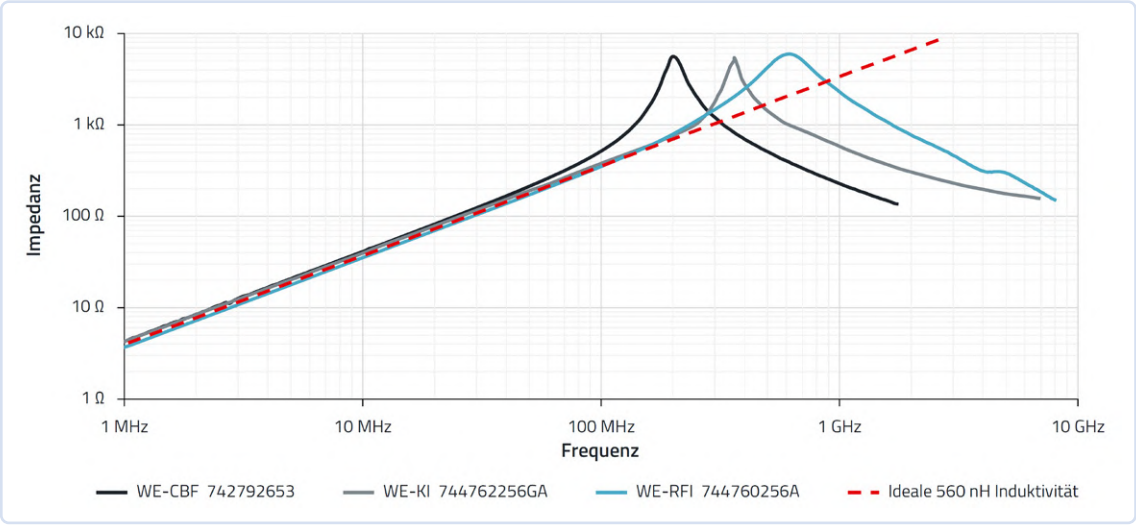
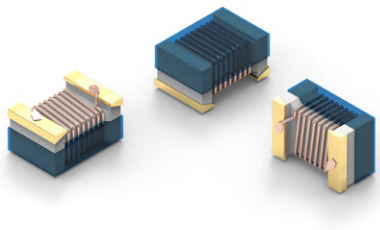
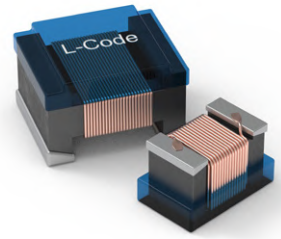


Bild 1. Vergleich der Impedanzen von SMT-Ferrit, Keramik-/ Luftinduktivität und drahtbewickelter Ferrit.



Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
Inductance	L	25 MHz	560	nH	±2%
Q-Factor	Q	100 MHz	45		min.
DC Resistance	R_{DC}	@ 20 °C	1.5	Ω	max.
Rated Current	I_R	ΔT = 15 K	310	mA	max.
Self Resonant Frequency	f_{res}		430	MHz	min.

Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
Impedance @ 100 MHz	Z	100 MHz	600	Ω	±25%
Maximum Impedance	Z_{max}	200 MHz	4500	Ω	typ.
Rated Current 1	$I_{R\,1}$	ΔT = 20 K	300	mA	max.
Rated Current 2	$I_{R\,2}$	ΔT = 40 K	500	mA	max.
DC Resistance	R_{DC}	@ 20 °C	0.65	Ω	max.
Type	High Speed				



Properties		Test conditions	Value	Unit	Tol.
Inductance	L	25.2 MHz	0.56	µH	±5%
Q-Factor	Q	100 MHz	45		min.
Impedance @ 100 MHz	Z	100 MHz	350	Ω	±25%
Maximum Impedance	Z_{max}	600 MHz	5570	Ω	typ.
Rated Current 1	$I_{R\,1}$	ΔT = 15 K	450	mA	max.
Rated Current 2	$I_{R\,2}$	ΔT = 40 K	620	mA	max.
DC Resistance	R_{DC}	@ 20 °C	0.55	Ω	max.
Self Resonant Frequency	f_{res}		340	MHz	min.

Bild 2. Vergleich der Parameter von SMT-Ferrit, Keramik-/Luftinduktivität und drahtbewickelter Ferrit.

selbstinduzierte gegenelektromagnetische Kraft (EMK) in der Spule, in Abhängigkeit von dieser Änderung.
Es ist bekannt, dass diese selbstinduzierte Gegen-EMK direkt proportional zur Änderungsrate des Stroms durch die Spule ist (Lenz'sche Regel) und deshalb mit der Frequenz ansteigt. Somit steigt auch der Blindwiderstand der Induktivität mit der Frequenz; dieser Verlauf ist proportional.
Eine weitere Erhöhung der Impedanz geschieht durch den Skin-Effekt. Ein Leiter nutzt bei niedrigen Frequenzen seine gesamte Querschnittsfläche als Transportmedium für Ladungsträger. Wenn die Frequenz erhöht wird, stellt ein erhöhtes Magnetfeld in Richtung der Mitte des Leiters eine Impedanz für die Ladungsträger dar, wodurch die Stromdichte in der Mitte des Leiters abnimmt und die Stromdichte am Rand des Leiters zunimmt. Diese erhöhte Stromdichte in der Nähe des Randes des Leiters ist als Skin-Effekt bekannt. Der Effekt steigt mit der Frequenz und tritt auch bei allen anderen Induktivitäten (mit Ferritkern) auf.
Die Resonanzfrequenz der Induktivität ohne Ferritkern entsteht primär durch die parasitäre Kapazität zwischen den einzelnen Windungen. Wann immer zwei Leiter in unmittelbarer Nähe angeordnet, aber durch ein Dielektrikum getrennt sind, und eine Spannungsdifferenz zwischen beiden existiert, bildet sich ein Kondensator.
Die Kette dieser Windungskapazitäten ist parallel zu der Wicklungsinduktivität geschaltet und bildet so einen Parallelresonanzkreis. Zusätzlich ergibt sich eine parasitäre Kapazität zwischen den Anschlüssen (Lötpads), die parallel zur Windungskapazität liegt.
Somit erhält man insgesamt als Ersatzschaltung eine parasitäre, der Wicklung parallel liegende Gesamtkapazität. Die äquivalente Ersatzschaltung ist in **Bild 3** links dargestellt.
Bei Induktivitäten mit Ferritkern (WE-RFI) und bei SMT-Ferriten (WE-CBF) ist im Datenblatt nicht ein Induktivitätswert, sondern eine Impedanz bei einer Messfrequenz angegeben. Es zeigt sich auch, dass der SMT-Ferrit die höchste Toleranz hat, die Induktivität ohne Ferrit hat die geringste Toleranz.
Da die Induktivität WE-KI keinen Ferritkern hat, benötigt sie für die gleiche Impedanz mehr Drahtwindungen als die Komponenten mit Ferrit, deshalb hat die WE-KI auch den größten Drahtwiderstand R_{DC}. Sowohl bei der WE-KI als auch bei der WE-RFI wird ein Q-Faktor, das heißt ein Gütefaktor angegeben, bei der WE-CBF hingegen nicht. Der Q-Faktor (Q) ist ein Maß für die dissipative Eigenschaft einer Induktivität. Induktivitäten mit hohem Q-Faktor

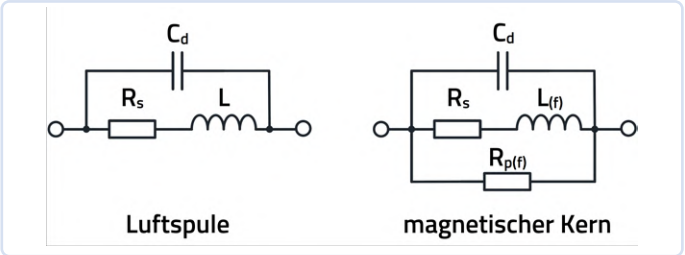


Bild 3. Ersatzschaltung einer Induktivität ohne magnetischem (links) und mit magnetischem Kern (rechts).

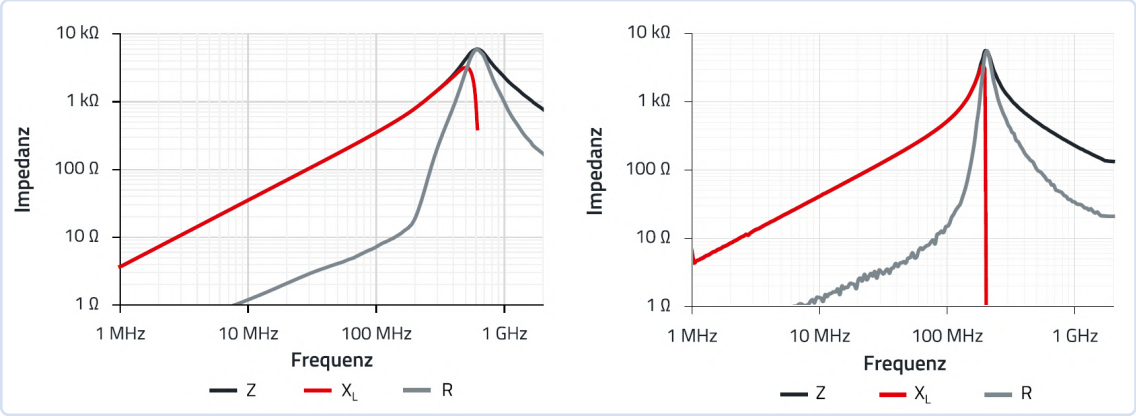


Bild 4. Typische Impedanzkurven der Induktivität WE-RFI 744760256A [4] (links) und des SMT-Ferrits WE-CBF 742792653 [5] (rechts).

haben geringe Verluste und eine schmalbandigere Impedanzkurve. Drosseln mit niedrigem Q-Faktor haben hingegen höhere Verluste und eine breitbandigere Impedanzkurve. Die Größe der maximalen Impedanz der Induktivität hängt mit dem Gütefaktor Q zusammen. Verlustarme Induktivitäten mit hohem Q-Faktor haben ein sehr hohes Impedanzmaximum, während eine verlustbehaftete Induktivität ein niedrigeres Impedanzmaximum aufweist. Durch Änderung der Art und Weise, wie eine Spule gewickelt ist, oder der verwendeten Kernmaterialien können das Impedanzmaximum und der Frequenzbereich des Impedanzmaximums ausgerichtet werden. Was hat es mit dem Impedanzmaximum auf sich?

Magnetische Kernwerkstoffe

Bild 4 zeigt die Impedanzkurven über der Frequenz der Induktivität WE-RFI und vom SMT-Ferrit WE-CBF. Beide Bauelemente haben Ferritmaterialien als Kernmaterial. Die Diagramme geben jeweils drei verschiedene Kurven an: R – als resistiver (ohmscher) Widerstand, X_L – als Blindwiderstand (induktiv) und Z – als Betrag der Impedanz des Bauelements. Um Induktivitäten mit Ferritmaterial erfolgversprechend einsetzen zu können, ist das Verständnis dieser Diagramme wichtig.
In vielen Hochfrequenzanwendungen, in denen große Induktivitätswerte auf kleinem Raum benötigt werden, können Induktivitäten mit „Luftkern“ aufgrund ihrer Größe nicht verwendet werden. Die Bauform der Induktivität wird kleiner, wenn der Luftkern durch ein Kernmaterial mit höherer magnetischer Permeabilität ($\mu_r > 1$) ersetzt wird.
Bei gleichbleibender Größe wird der Induktivitätswert trotz verringerter Anzahl an Windungen beibehalten.
Dadurch lassen sich mehrere Vorteile realisieren.

- Geringere Größe - aufgrund der geringeren Anzahl von Windungen, die für eine bestimmte Induktivität erforderlich sind.
- Erhöhte Güte - weniger Windungen bedeuten weniger Drahtwiderstand.
- Beeinflussung der Impedanz der Induktivität über der Frequenz – durch gezielte Auswahl/Mischung des Kernmaterials.

Die Verwendung von Magnetkernen bringt jedoch einige große Probleme mit sich, und es muss darauf geachtet werden, dass das gewählte Kernmaterial das richtige für die jeweilige Aufgabe ist; einige dieser Probleme sind:

- Jedes Kernmaterial ist ab einem spezifischen Frequenzbereich stark verlustbehaftet. So kann das Hinzufügen eines Magnetkerns zu einer Luftspule je nach verwendetem Material und der Betriebsfrequenz die Güte der Induktivität verringern.
- Die Permeabilität aller Magnetkerne ändert sich mit der Frequenz und sinkt in der Regel auf einen sehr kleinen Wert am oberen Ende ihres Betriebsbereichs. Sie nähert sich schließlich der Permeabilität von Luft ($\mu_r = 1$) und wird für den Stromkreis „unsichtbar“.
- Je höher die Permeabilität des Kerns ist, desto empfindlicher ist er gegenüber Temperaturschwankungen. Daher kann die Induktivität der Spule über weite Temperaturbereiche erheblich schwanken.
- Die Permeabilität des Magnetkerns ändert sich mit dem angelegten Signalpegel. Ein zu großer Strom durch die Induktivität und eine damit zu hohe magnetische Flussdichte durch den Kern führt zur Sättigung des Kerns.

Diese Probleme können überwunden werden, wenn bei der Entwicklung darauf geachtet wird, dass die Induktivitäten entsprechend ihrer Verwendung richtig ausgewählt werden. Dazu benötigt man die Impedanzdiagramme mit den drei verschiedenen Impedanzkurven R, X_L und Z. Der Verlauf der Kurven über der Frequenz hängt stark von den magnetischen Eigenschaften des Kernmaterials ab.
Die Ersatzschaltung einer Induktivität ohne magnetischen Kern ist in **Bild 3** links dargestellt. Die Güte Q dieser Induktivität mit „Luftkern“ ergibt sich nach **Gleichung 1**:

$$Q = \frac{X_L}{R_S}$$

wobei für X_L gilt **(Gleichung 2)**:

$$X_L = \omega \cdot L$$

mit R_S = der Widerstand der Wicklungen.

Wenn man der Induktivität einen Magnetkern hinzufügt, sieht die Ersatzschaltung wie in **Bild 3** rechts aus. Es wurde der Widerstand $R_p(f)$ hinzugefügt, um die Verluste, die im Kern selbst auftreten, darzustellen. Diese frequenzabhängigen Verluste treten in Form von magnetischer Hysterese auf. Bei der Hysterese handelt es sich um die Verlustleistung im Kern, die aufgrund der Wirbelströme und der Neuausrichtung der magnetischen Teilchen im Material bei Änderungen der Magnetisierung auftritt. Wirbelströme fließen im Kern aufgrund der darin induzierten Ströme. Zusätzlich wurde auch der Induktivität L eine Frequenzabhängigkeit $L_{(f)}$ zugewiesen, da, wie schon oben erwähnt, die magnetische Permeabilität des

Materials nichtlinear über der Frequenz f ist. Somit ist die Güte einer Induktivität mit Ferritkern ein variabler Parameter, der von dem durch die Induktivität fließenden Strom und dessen Frequenz abhängt und dementsprechend individuell ermittelt werden muss. Ferrit ist ein Material, das hauptsächlich Eisen enthält. Es wird aus einer Mischung von Eisenoxid und anderen Spurenmetallen hergestellt. Da das Material eine geringe elektrische Leitfähigkeit hat, hält es Wirbelströme und damit die Wirbelstromverluste gering. Eine besondere Eigenschaft dieser Materialien ist die starke Abhängigkeit von Frequenz, magnetischer Flussdichte und Temperatur.

Komplexe Permeabilität

Die magnetische Eigenschaft von Materialien lässt sich über die „magnetische Permeabilität" μ beschreiben. Mit μ wird eine Eigenschaft beschrieben, die die magnetische Reaktion der Flussdichte B quantifiziert, wenn das Material einer magnetischen Feldstärke H ausgesetzt ist. Die magnetische Permeabilität ist proportional zum Verhältnis der Änderungen von B und H **(Gleichung 3)**:

$$\mu = \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

Der Wert der absoluten Permeabilität μ drückt das direkte Verhältnis von B (T) zu H (A/m) aus, daher ist die resultierende SI-Einheit (H/m). Die relative Permeabilität ist einheitenlos, bezieht sich auf die Permeabilität des Vakuums (μ_0) und wird meist in Datenblättern von Induktivitäten angegeben. Die relativen Werte ermöglichen es, eine leicht nachvollziehbare Kennzahl zu erhalten, inwieweit das betreffende Material das Magnetfeld „besser" bündelt, beziehungsweise „konzentriert" als das Vakuum.

Somit ergibt sich der Zusammenhang nach **Gleichung 4**:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

mit μ_0: Magnetische Permeabilität des Vakuums: $1{,}26 \times 10^{-6}$ (H / m).

Die meisten verwendeten Ferrit-Materialien sind Eisenpulver-Mischungen mit Mangan-Zink- (MnZn) und Nickel-Zink-Beimengungen (NiZn); μ_r liegt bei MnZn typisch im Bereich von 600…15.000 und bei NiZn im Bereich von 10…1.500. Zu beachten ist, dass die relative Permeabilität stark von der Frequenz des Magnetfeldes abhängt. Weiterhin deuten die Kurven in Bild 4 schon darauf hin, dass die relative magnetische Permeabilität zwei Komponenten, einen realen Anteil μ_r' und einen imaginären Anteil μ_r" hat. Diese komplexe Permeabilität kommt bei hochfrequenten Magnetfeldwirkungen zum Tragen, bei denen eine Phasenverschiebung zwischen H und B entsteht. Somit ergibt sich **Gleichung 5**:

$$\mu = \frac{B_0 \cdot e^{j(\omega t-\delta)}}{H_0 \cdot e^{j\omega t}} = \frac{B_0}{H_0} \cdot e^{-\delta} = \frac{B_0}{H_0} \cdot \cos(\delta) = -j \cdot \frac{B_0}{H_0} \cdot \sin(\delta)$$

angewandt auf die Induktivität mit Ferritkern ergeben sich **Gleichung 6** und **Gleichung 7**:

$$L_S = \mu' \cdot L_0 \qquad \text{und} \qquad R_S = \omega \cdot L_0 \cdot \mu''$$

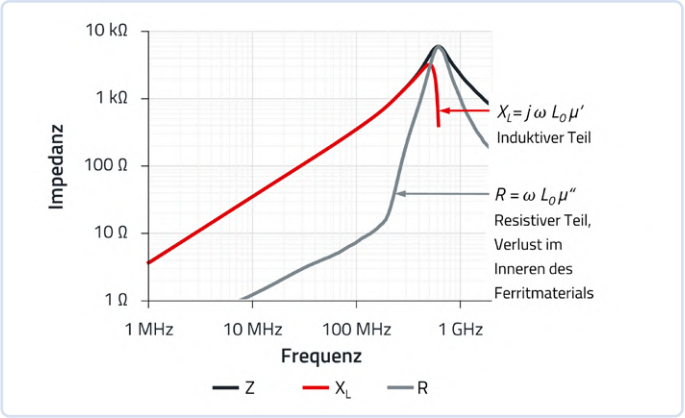


Bild 5. Impedanzkurven der Induktivität WE-RFI 744760256A [4].

wobei L_0 die Induktivität der Drahtwicklung ohne Ferrit ist.

Somit gilt der Zusammenhang in **Gleichung 8**:

$$\underline{Z} = j \cdot \omega \cdot L_0 \cdot (\mu' - j \cdot \mu'') = R + j \cdot X_L$$

mit L_0: Induktivität ohne Ferrit.

Aus den Formeln lässt sich leicht erkennen, dass eine hohe Permeabilität zu einer hohen Induktivität führt, doch eine hohe Permeabilität ist meist mit höheren Kernverlusten verbunden.
Die einzelnen Komponenten der Impedanz, also Z(f), X_L(f) und R(f), sind in den Datenblättern der Ferrit-Induktivitäten abgebildet. **Bild 5** zeigt nun noch einmal die Impedanzkurven der Induktivität WE-RFI 744760256A [4].
Somit wird auch klar, warum bei der Anwendung von Induktivitäten mit Ferritkern die Impedanzkurven für eine funktionierende Schaltung von hoher Bedeutung sind. Die Impedanz Z ist eine Vektorkombination aus Widerstand und Phase. Der ohmsche Widerstand R hat eine dissipative Eigenschaft, Energie wird umgewandelt und nicht zurückgewonnen. Der Blindwiderstand X_L ist der Teil der Impedanz, der durch die Induktivität erzeugt wird. Die Phase ist die Verzögerung zwischen einer an das Bauteil angelegten Spannung und dem durch das Bauteil fließenden Strom. Sowohl der ohmsche als auch der Blindwiderstand variieren mit der Frequenz, somit also auch die Phase.
Damit aber nicht genug. Magnetische Materialien zeigen Sättigungseffekte, die über der Frequenz vor allem von der magnetischen Flussdichte, das heißt vom Strom abhängt, der durch die Ferrit-Induktivität fließt. Man spricht hier von Kernsättigung, ein Effekt, den die „Luftinduktivität" nicht hat. **Bild 6** zeigt die Impedanz der beiden Induktivitäten WE-RFI 744760256A [4] und WE-CBF 742792653 [5] bei unterschiedlicher Gleichstrom-Vormagnetisierung (DC-Bias) über der Frequenz. Der Unterschied ist deutlich zu erkennen.
Drahtbewickelte Induktivitäten sind bei gleichem Nennstrom weniger empfindlich gegen Gleichstromvorsättigung (Current-Bias) als SMT-Ferrite.
Der Einfluss von Vormagnetisierungen unterschiedlicher Stärke auf die Impedanzkurven lässt sich mit der Online-Simulationsplattform von Würth Elektronik RedExpert [6] für alle Artikelnummern simulieren.

Typische Einsatzgebiete der Induktivitäten

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Parameter der drei Induktivitäten-Typen und ihre bevorzugten Anwendungsfelder.

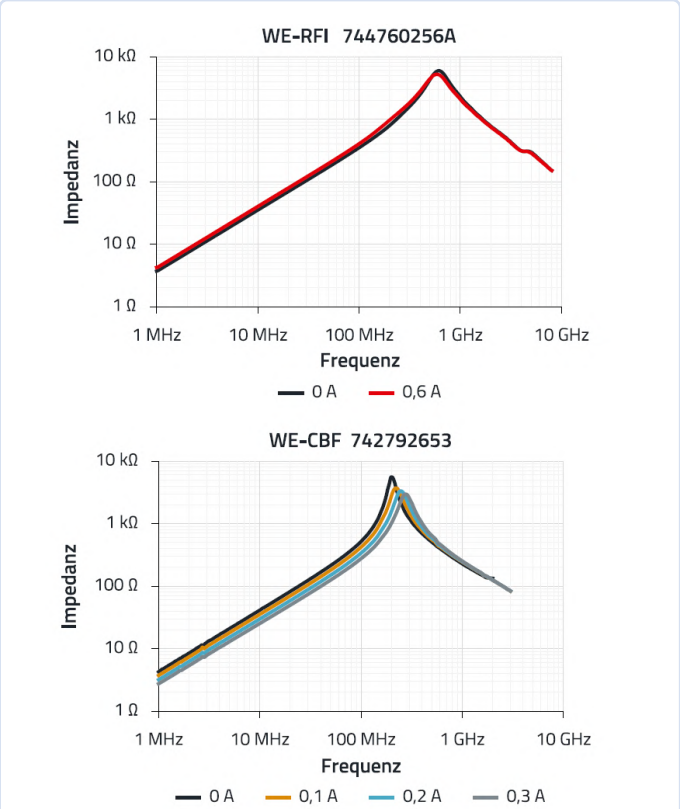


Bild 6. Impedanz der beiden Induktivitäten WE-RFI 744760256A [4] und WE-CBF 742792653 [5] bei unterschiedlicher Gleichstrom-Vormagnetisierung über der Frequenz.

Über den Autor

Dr.-Ing. Heinz Zenkner hat Elektrotechnik mit Schwerpunkt Nachrichten – und Hochfrequenztechnik studiert und promoviert. Er ist seit vielen Jahren öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für EMV. Neben zahlreichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen betätigt er sich häufig als Autor in vielen Werken zur EMV. Zusätzlich hat Zenkner an verschiedenen Universitäten, an der IHK und an zahlreichen Seminaren als Dozent gearbeitet. Seit vielen Jahren beschäftigt er sich mit industrieller Elektronik, von der ersten Idee eines Produktes bis hin zur Serienproduktion. Sein besonderes Interesse gilt der drahtlosen Energieüberragung, zu der er sowohl theoretisch als auch praktisch eigene Konzepte entwickelt hat.

Die Aspekte der Messung des Impedanzverhaltens sowie detaillierte Tipps zum Einsatz der passenden Induktivität in verschiedenen Anwendungen würden hier den Rahmen sprengen.
Die AppNote ANP129 von Würth Elektronik [7], auf der dieser Artikel basiert, schlägt weiterführend einen Aufbau zur Messung des Impedanzverhaltens vor und stellt eine einfache Messmethode zur Impedanz vor.
Darüber hinaus werden am Beispiel eines 20-MHz-Signalgenerators die verschiedenen Einsatzfelder der unterschiedlichen Induktivitäten-Typen dargestellt.

240520-02

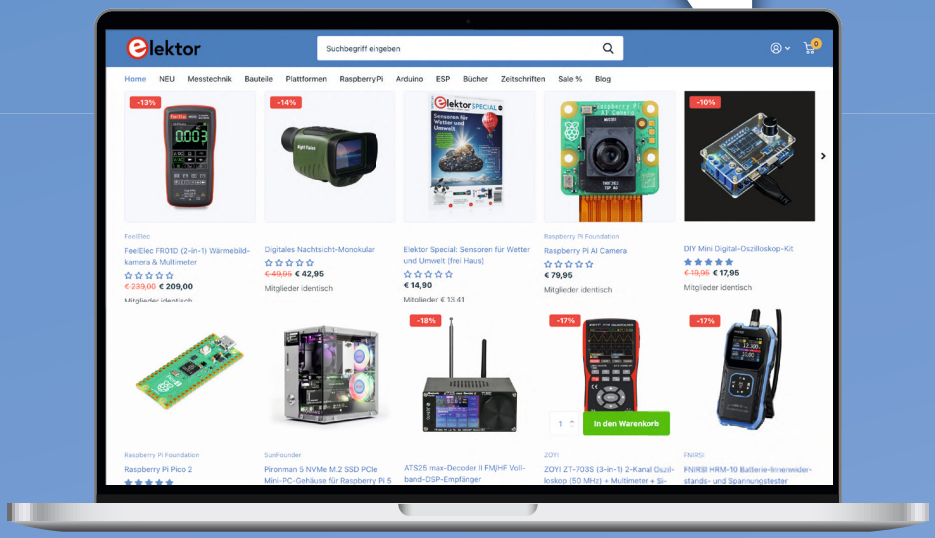
Tabelle 1. Die wichtigsten Parameter von SMT-Ferrit, Keramik-Induktivität und drahtbewickelter Ferrit-Induktivität

Parameter	SMT-Ferrit	Keramik-Induktivität	Drahtbewickelte Ferrit-Induktivität
Induktivitätsbereich	---	klein	hoch
Impedanzbereich	hoch	klein	hoch
Toleranz der Induktivität	hoch	sehr gering	gering
Nennstrombereich	hoch	sehr hoch	gering
Verlustwiderstand R_{DC}	klein	sehr klein	mittel/hoch
Frequenz der Eigenresonanz	hoch	sehr hoch	niedrig/mittel
Ausprägung der Resonanzfrequenz	breit	eng	eng, mehrfach
Güte im Bereich unter der Resonanzfrequenz	klein	sehr hoch	mittel
Bevorzugte Applikation	Dämpfung/Reduktion von HF-Strömen	HF-Filter und Schwingkreise	Hochfrequente Entkopplung, steile Filter, Dämpfung/Reduktion von HF-Strömen

WEBLINKS

[1] SMT-Ferrit WE-CBF von Würth Elektronik: https://www.we-online.com/de/components/products/WE-CBF
[2] SMT-Induktivität mit Keramikkern von Würth Elektronik: https://www.we-online.com/de/components/products/WE-KI
[3] Drahtgewickelter SMT Bead Ferrit von Würth Elektronik: https://www.we-online.com/de/components/products/WE-RFI_FERRITE_BEAD
[4] WE-RFI 744760256A: https://www.we-online.com/de/components/products/WE-RFI?sq=744760256A#744760256A
[5] WE-CBF 742792653: https://www.we-online.com/de/components/products/WE-CBF?sq=742792653#742792653
[6] Beispiel-Simulation in RedExpert: https://we-online.com/re/5oGcZLA5
[7] Zenkner, H., „Induktivitäten, SMT-Ferrite und drahtbewickelte SMT-Ferrite – Der Draht macht den Unterschied", AppNote ANP129 von Würth Elektronik: https://www.we-online.de/ANP129

Was ist Ihre Meinung?



Bei Elektor bieten wir mehr als nur Elektronik - wir schaffen ein Erlebnis, von Qualitätsprodukten und außergewöhnlicher Kundenbetreuung, unterstützt durch die Leidenschaft unserer Community.

Teilen Sie Ihre Meinung auf

www.elektor.de/pages/customer-reviews

★★★★★

Günther A.
Das Meßgerät wurde kurzfristig geliefert. Solide Ausführung, gut ablesbares Display, zuverlässige Kontaktierung der 4-Leiter Kelvin Meßleitungen, hohe Genauigkeit der Meßwerte (Spannung, Innenwiderstand)

★★★★★

Matthias D.
Ich hatte die Elektor schon in der 80ern und dann etwas aus den Augen verloren. Es ist wie damals: prima Schaltungsideen, anwendbar, sehr gut erklärt, alles bestens. Danke und bitte weiter so.

★★★★★

Hartmut W.
Sehr guter Service!

Schnelle Lieferung, gute Bezahlmöglichkeit, Gerät top. Sehr zu Empfehlen!
Werde weiter Bestellen.

elektor
design › share › earn

EMI-Abschirmung zur Einhaltung der elektromagnetischen Konformität

Von Mark Patrick (Mouser Electronics)

In diesem Beitrag befassen wir uns mit der Bedeutung der Abschirmung gegen elektromagnetische Störungen (Electromagnetic Interference, EMI) für die Einhaltung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV), insbesondere im Zusammenhang mit modernen Technologien wie 5G und dem Internet der Dinge (IoT). Der Beitrag untersucht auch verschiedene EMI-Abschirmtechniken, -Materialien und -Strategien, die Entwickler während des gesamten Designprozesses einsetzen können, um Störungen zu vermeiden und die Zuverlässigkeit des Produkts zu gewährleisten.

Technologische Fortschritte, beispielsweise die zunehmende Einführung von 5G und die wachsende Bedeutung des Internets der Dinge (IoT), führen zu einem höheren Bedarf an Abschirmung gegen elektromagnetische Störungen (EMI). Die Einhaltung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) und die Reduzierung von EMI-Quellen in einem frühen Stadium des Entwicklungsprozesses sind von entscheidender Bedeutung, um Effizienzverluste zu verhindern, kostspielige Neukonstruktionen zu vermeiden und Verzögerungen bei der Produkteinführung zu minimieren. Jedes Designteil oder Subsystem – vom Gehäuse über das Modul bis hin zur Leiterplatte (PCB) – kann eine EMI-Abschirmung enthalten.

Entwickler können in jeder Phase des Designprozesses auf eine Vielzahl von Abschirmungsoptionen für nahezu jede Applikation zurückgreifen, von kommerziellen Anwendungen über Energieinfrastruktur und Verteidigung bis hin zum Bereich Automotive. Dieser Beitrag soll Entwicklern einen Einblick in die technologischen Fortschritte geben, mit denen die aktuellen Ansätze zur EMI-Abschirmung auf den Prüfstand gestellt werden, und einen Überblick über die auf dem Markt erhältlichen Materialien bieten.

Elektromagnetische Störungen sind allgegenwärtig

Elektromagnetische Felder sind ein Merkmal praktisch jeder Schaltung. Oszillierende elektrische Felder und magnetische Flusslinien (**Bild 1**) treten um den leitfähigen Pfad herum auf, wenn ein Wechselstrom entlang eines Drahtes oder durch eine Leiterplatte fließt. Diese werden zu unerwünschten Störungen, wenn diese Felder induziert oder auf eine andere Schaltung oder einen anderen Draht übertragen werden. Solche unerwünschten elektromagnetischen Störungen werden im Allgemeinen als EMI bezeichnet und können den Betrieb anderer Schaltungen stören oder unterbrechen.

Eine elektrostatische Entladung (Electrostatic Discharge, ESD) ist eine weitere Form von EMI. ESD tritt in der Regel mit unterschiedlicher Frequenz auf, während EMI typischerweise eine konstante Frequenz haben. Kurzzeitige Hochspannungstransienten (hohe dV/dt) können zu Fehlfunktionen

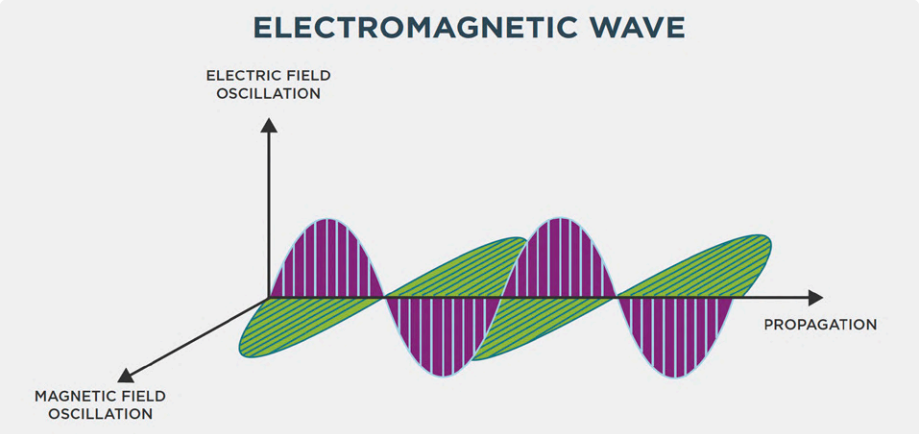


Bild 1. Die magnetischen und elektrischen Felder einer elektromagnetischen Welle. (Quelle aller Bilder: Kemtron Ltd, jetzt Teil von TE Connectivity)

oder dauerhaften Schäden an empfindlichen elektronischen Systemen führen. Die meisten elektronischen Systeme erzeugen unbeabsichtigt EMI, darunter Taktgeber, digitale Hochgeschwindigkeits-Schaltwandler, DC/DC-Wandler und drahtlose Schnittstellen.

EMI-Emissionen finden ihren Weg in andere Schaltungen entweder durch Leitung oder Strahlung. Beispielsweise können kleine Taktgeber, an denen entlang Leiterbahnen einer Leiterplatte verlaufen, Strahlung abgeben, in der Regel über 10 MHz, da die Leiterbahnen zu aktiven Antennen werden. Das grundlegende Prinzip von EMV besteht darin, dass eine Schaltung oder ein System immun gegen EMI ist (**Bild 2**).

Marktdynamik und Trends

Ständige Konnektivität und Erreichbarkeit sind allgegenwärtig geworden. Ob zu Hause, unterwegs, bei der Arbeit oder im Auto – unsere Gesellschaft hat noch nie so viele Vorteile einer zuverlässigen und belastbaren Kommunikationsinfrastruktur genossen. Der Aufstieg des IoT und seines Pendants, des Industriellen Internets der Dinge (IIoT), sowie das Wachstum der Mobilfunkkommunikation haben unseren Bedarf und unsere Abhängigkeit von drahtloser Kommunikation verstärkt, die allerdings leider ein wesentlicher Faktor und eine potenzielle EMI-Quelle ist. Die Einführung von drahtlosen 5G-Infrastrukturen, die bisher ungenutzte Funkfrequenzen im Ultra-Hochfrequenzbereich nutzen, führt zu einer weiteren Ausweitung der Gefahr von EMI. Daher ist es wichtiger denn je, dass Produkte EMI-immun sind.

Normen für elektromagnetische Verträglichkeit

Mit nationalen und regionalen Normen zur elektromagnetischen Verträglichkeit, die sich typischerweise an international anerkannten EMV-Standards orientieren (**Bild 3**), erhalten Hersteller die technischen Daten an die Hand, die Produkte vor dem Verkauf erfüllen müssen. Die Normen legen die maximal zulässigen Emissionen eines Produkts und seine Immunität oder Anfälligkeit gegenüber abgestrahlten oder leitungsgebundenen Emissionen fest. Bei der Entwicklung eines neuen Designs wird empfohlen, dass die Entwickler die Gefahr

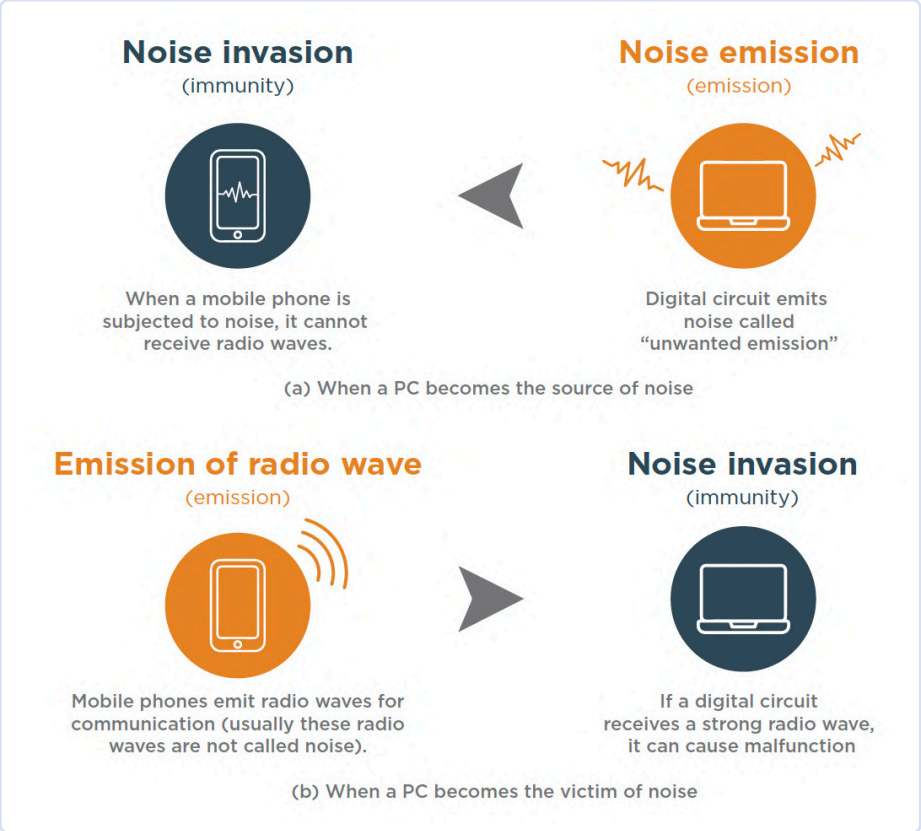


Bild 2. Die Störfestigkeit gegenüber EMI-Emissionen ist der Schlüssel zur Einhaltung der EMV-Vorschriften.

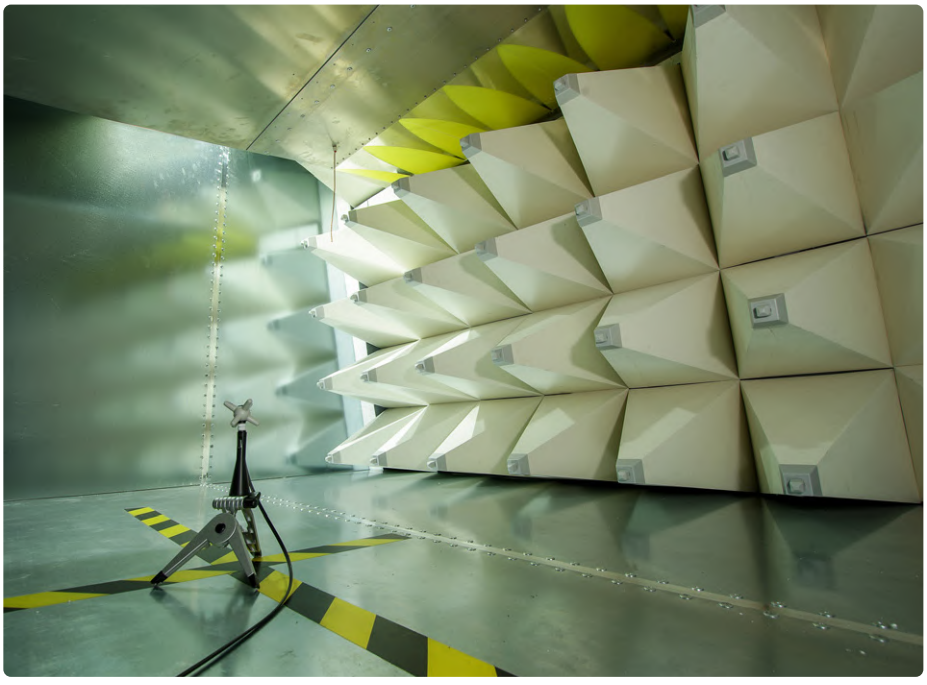


Bild 3. Prüfung eines zu prüfenden Geräts auf Einhaltung der EMV-Vorschriften.

Tabelle 1. Gängige EMI- und EMV-Normen, aufgegliedert nach Branche und Anwendung

Application / Industry	EMC Standard
Aerospace, Defense and Marine equipment	DEF STAN 59-411 MIL-STD-461 MIL-STD-704 MIL-STD-1275 MIL-STD-1399
Automotive components	IEC CISPR 25 ISO 11451 ISO 11452 ISO 7637 SAE (multiple numbers)
Commercial equipment	FCC Part 15 class B IEC 61000-6-1 (generic) IEC 61000-6-3 (generic)
Industrial devices	FCC Part 15 class A IEC 61000-6-2 (generic) IEC 61000-6-4 (generic)
Medical devices	IEC 60601-1-2
Power station and substitution equipment	IEC 60000-6-5
Power station and measurement equipment (<1000 V AC, 1500 V DC)	IEC 61326-1
Switch gears and control gears (1000 V AC, 1500 V DC)	IEC 60947-1

IEC: International Electrotechnical Commission
ISO: International Organization for Standards
SAE: Society of Automotive Engineers
FCC: Federal Communications Commission

(Source: Kemtron Ltd, now part of TE Connectivity)

von EMI berücksichtigen und EMV-Gegenmaßnahmen bereits während des Prototyping-Prozesses und nicht erst im Nachhinein integrieren. Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, die geltenden EMI- und EMV-Normen, die wahrscheinlichen Emissionsquellen und die Schaltungsfunktionen zu kennen, die möglicherweise anfälliger für EMI-Störungen sind (siehe **Tabelle 1**).

Erreichen der EMV-Zertifizierung

Auch wenn nur eine akkreditierte EMV-Prüfstelle die EMV-Zertifizierung durchführen kann, gibt es für das Entwicklerteam doch viele Punkte, die vor der Übergabe des Produkts an das Prüflabor untersucht werden können. Grundlegende Messungen der strahlungsgebundenen und leitungsgebundenen Emissionen mit einem Spektrumanalysator oder einem mit geeigneten H- und E-Feldsonden ausgestatteten EMI-Empfänger zeigen an, ob weitere Tests oder EMI-Gegenmaßnahmen erforderlich sind. Für ein kleines Entwicklungsteam sind diese teuren Prüfgeräte nur schwer zu beschaffen, aber spezialisierte Unternehmen, die EMI-Prüf- und Messgeräte vermieten, bieten eine kostengünstige Alternative. Es wird dringend empfohlen, Prüfungen zur Einhaltung der Vorschriften durchzuführen, da das Designteam dadurch potenzielle Quellen von Störsignalen lokalisieren und Methoden zur Reduzierung von elektromagnetischer Interferenz wie Abschirmung, Erdung und Entkopplung implementieren kann. Es ist auch wichtig, dass ein Produkt elektromagnetischen Emissionen ausgesetzt wird.

Stufen der EMI-Abschirmung

Die Reduzierung von EMI und die Schaffung von EMI-Immunität für Schaltungsfunktionen setzen einen systematischen Ansatz im Designprozess des Produkts voraus. Dies umfasst Aspekte des Leiterplatten-Designs, die Integration von Masseflächen und die Trennung von Geräten mit EMI-Störungen von empfindlichen analogen Signalpfaden. Die Abschirmung von Bauteilen, Funktionsteilen und Modulen stellt aufgrund einer

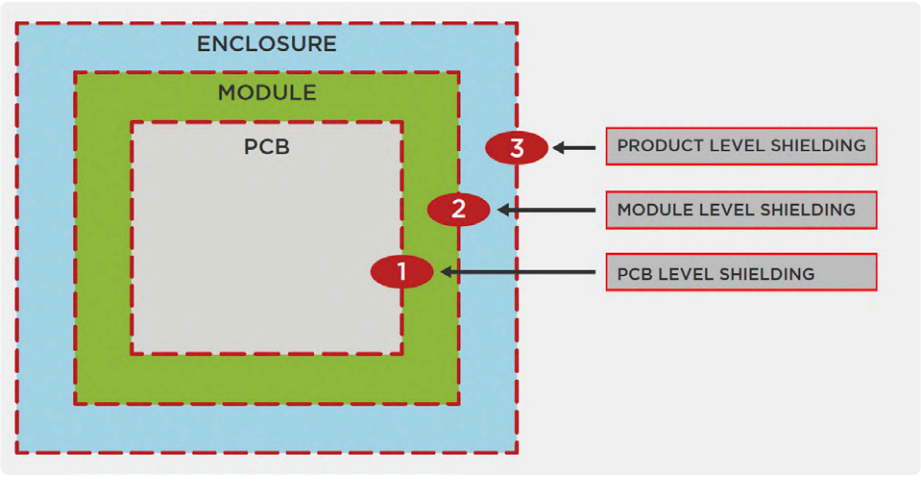


Bild 4. Der dreistufige Ansatz zur Umsetzung der EMI-Abschirmung.

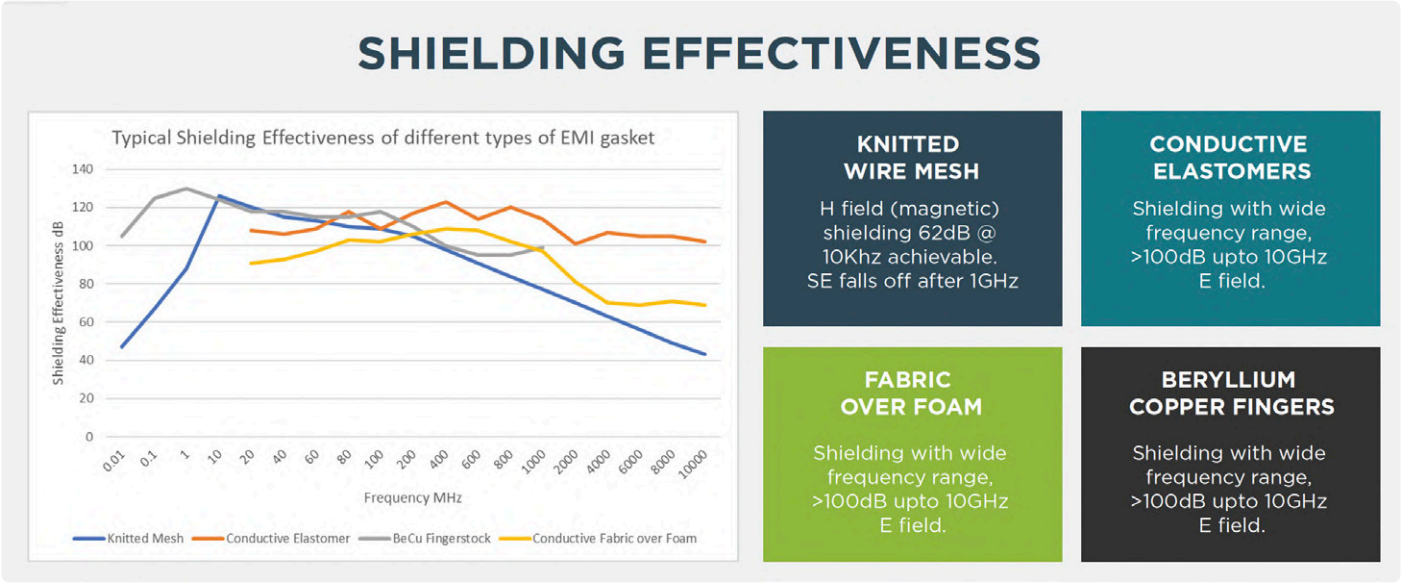


Bild 5. Die EMI-Dämpfungseigenschaften von vier gängigen EMI-Abschirmungsmaterialien in Abhängigkeit von der Frequenz.

dreistufigen Methode, die sich auf Gehäuse, Module und Leiterplatten konzentriert, einen praktischen Ansatz für viele Applikationen dar (**Bild 4**).

Die Abschirmung von Strahlungsemissionen funktioniert durch die Schaffung eines faradayschen Käfigs um die EMI-Quelle herum. Die Implementierung einer Abschirmung auf Gehäuseebene reduziert das Entweichen oder Eindringen potenzieller Störquellen. Einige Schaltungsfunktionen können jedoch zusätzliche Schutzebenen verlangen, um zu verhindern, dass interne EMI andere Schaltungsfunktionen beeinträchtigt. Die Abschirmung auf modularer Ebene ist eine große Hilfe und wird regelmäßig bei Funkmodulen, DC/DC-Schaltwandlern und LCD-Panels eingesetzt. Bei empfindlichen Komponenten wie beispielsweise einem Analog-Digital-Wandler-IC kann eine Abschirmung auf Leiterplattenebene erforderlich sein. Die Notwendigkeit einer Abschirmung gilt auch für alle Arten von Verbindungen, daher sollte nicht übersehen werden, dass abgestrahlte Emissionen auch nicht durch Kabelverschraubungen, Stecker und Buchsen entweichen dürfen.

Materialien für die EMI-Abschirmung

Zu den Bauteilen, die zur EMI-Abschirmung verwendet werden, zählen Drahtgestrick-Dichtungen, elektrisch leitfähige Elastomere, leitfähige Gewebe und Metallfinger. Jeder dieser Typen weist leicht unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf die Dämpfung elektromagnetischer Störungen auf und eignet sich für bestimmte Anwendungsfälle. **Bild 5** veranschaulicht die Dämpfung dieser vier Abschirmungstypen in Abhängigkeit von der Frequenz.

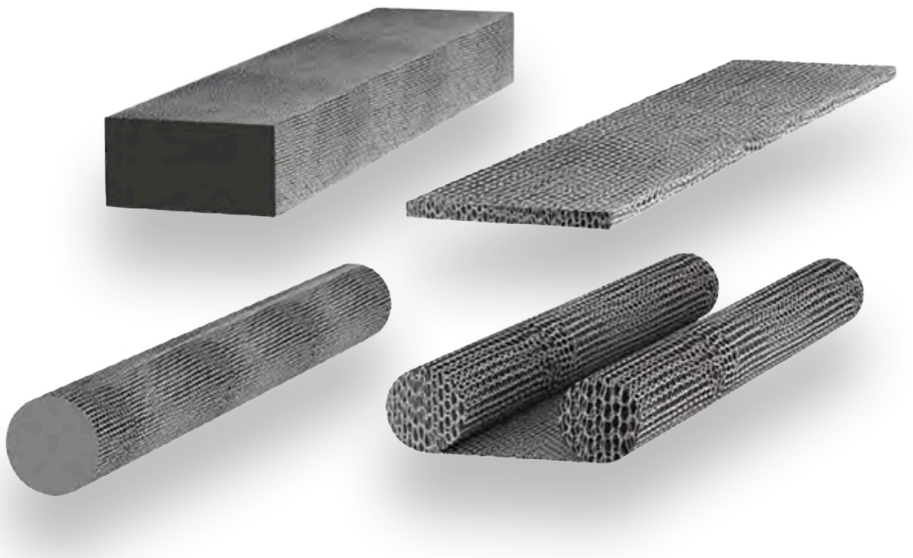


Bild 6. Die Kemtron-Drahtgestrick-Dichtungen von TE Connectivity sind in Endloslängen und in spezifischen Größen erhältlich.

Drahtgestrick: Die Verwendung mehrerer gestrickter Drahtlagen über einem Schwamm oder einem Rohrkern unter Verwendung verschiedener Materialien bietet eine effektive Lösung für elektromagnetische Störungen und galvanische Kompatibilität. Der Strickansatz ermöglicht die Herstellung komplexer Formen und die Verbindung mit Trägermaterialien, um einen Schutz gegen Eindringen von EMI zu schaffen. Die Abschirmung durch ein Drahtgestrick eignet sich für verschiedene Anwendungsfälle, darunter Schaltschranktüren, Abdeckungen und abnehmbare Deckplatten. Das Betriebsverhalten der Abschirmung nimmt in der

Bild 7. Elektrisch leitende Elastomere von Kemtron / TE Connectivity bieten eine Dämpfung von bis zu 100 dB bei 10 GHz.

Regel über 1 GHz hinaus ab, es sei denn, es werden zusätzliche Schichten integriert. Beispiele hierfür sind die Kemtron-Reihe von Drahtgestrick-Dichtungen von TE Connectivity (**Bild 6**), die in geschnittenen Längen oder in fertigen Formen für Dichtungen erhältlich sind [1].

Elektrisch leitfähige Elastomere: Die Produktpalette von Kemtron Ltd (jetzt Teil von TE Connectivity) ist in verschiedenen Materialien und Formen erhältlich (**Bild 7**) und bietet eine Dämpfung von über 100 dB bis zu 10 GHz [2]. Zu den Füllmaterialien zählen versilbertes Aluminium und vernickelter Graphit, als Bindemittel kommen Silikon oder Fluorsilikon zum Einsatz. Zu den gängigen Produktformen zählen Platten, Flachdichtungen und O-Ringe. „Kontermutter"-O-Ring-Dichtungen sind speziell für die Abschirmung von HF-EMI konzipiert und für die gängigsten Steckverbinderformate erhältlich [3].

Wabenförmige Lüftungsöffnungen: Bei Applikationen, bei denen ein Lüfter zur Zwangsluftkühlung verwendet wird, bietet die Öffnung des Lüfters einen direkten Weg für Störungen, die aus einem ansonsten EMI-abgeschirmten Gehäuse austreten. Um dies zu verhindern, können wabenförmige Lüftungsöffnungen, wie die der Produktreihe von Kemtron/TE Connectivity, verwendet werden. Diese bieten eine verbesserte EMI-Leistung und ermöglichen gleichzeitig einen ausreichenden Luftstrom durch ihre laminierte, einschichtige Aluminiumfolien-Wabenzellen-Bauweise. Die Lüftungsöffnungen sind in allen gängigen Lüftergrößen von 40 mm bis 120 mm erhältlich [4].

Einhaltung der EMV-Vorschriften durch EMI-Abschirmungen

Elektromagnetische Störungen durch unerwünschte Störaussendungen von Geräten stören den zuverlässigen Betrieb von Systemen. Die Einhaltung der EMV-Vorschriften ist eine gesetzliche Anforderung und unerlässlich, um ein fehlerhaftes Systemverhalten zu vermeiden. In diesem kurzen Beitrag haben wir einige Methoden zur Abschirmung vorgestellt, die Entwickler zur Verbesserung der Störfestigkeit umsetzen können.

240531-02

Über den Autor

Als Direktor für technische Inhalte bei Mouser Electronics im EMEA-Wirtschaftsraum ist Mark Patrick für die Erstellung und Verbreitung technischer Inhalte verantwortlich - Inhalte, die für die Strategie von Mouser zur Unterstützung, Information und Inspiration des technischen Publikums entscheidend sind. Bevor er die Leitung des Bereichs Technical Content übernahm, war Mark Patrick Teil des *EMEA Supplier Marketing Teams* von Mouser und spielte eine wichtige Rolle beim Aufbau und der Entwicklung von Beziehungen zu wichtigen Fertigungspartnern. Marks frühere Erfahrungen umfassen praktische Ingenieursaufgaben, technischen Support, technischen Halbleitervertrieb und verschiedene Marketingpositionen. Mark ist im Herzen ein „praktischer" Ingenieur und hat einen erstklassigen Abschluss in Elektrotechnik von der Coventry University. Seine Leidenschaft gilt alten Synthesizern und der Wartung und Reparatur britischer Motorräder, wobei er nicht scheut, selber zum Schraubschlüssel zu greifen.

WEBLINKS

[1] Drahtgestrick-Dichtungen: https://www.mouser.de/new/te-connectivity/te-kemtron-knitted-wire-mesh-gaskets/
[2] Elektrisch leitfähige Elastomere: https://www.mouser.de/new/te-connectivity/te-kemtron-emi-connector-gaskets/
[3] Kontermutter: https://www.mouser.de/new/te-connectivity/te-kemtron-jam-nut-seals/
[4] Wabenförmige Lüftungsöffnungen: https://www.mouser.de/new/te-connectivity/te-kemtron-honeycomb-air-vents/

redpitaya

Das ultimative Werkzeug für jeden Elektronik-Enthusiasten

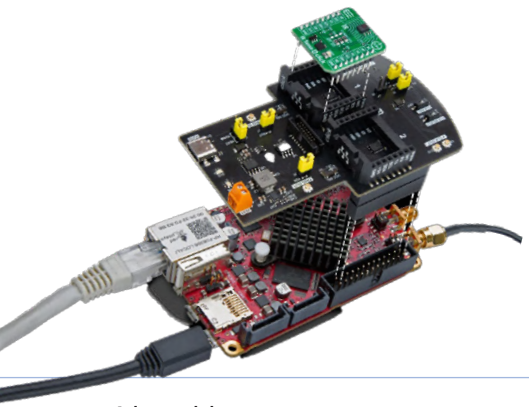
Unendliche Möglichkeiten mit Red Pitaya und 1.000+ Click Boards™

Ein Beitrag von Red Pitaya

Wenn Sie ein Elektronik-Enthusiast sind, der seine Projekte verbessern möchte, ist ein Red-Pitaya-Board das richtige Werkzeug für Sie. Diese revolutionäre Open-Source-Plattform vereint mehrere Instrumente in einem kompakten Gerät und ist damit ein Muss für Ingenieure, Bastler und Forscher. Ein Red-Pitaya-Board wird oft als Schweizer Taschenmesser der Elektronik bezeichnet und ersetzt sperrige Laborgeräte wie Oszilloskope, Signalgeneratoren und Spektrumanalysatoren - es bietet leistungsstarke Funktionen in einem kompakten, kreditkartengroßen und erschwinglichen Paket. Mit seinem Open-Source-Design fördert es außerdem die Innovation, indem es den Nutzern die Entwicklung und den Austausch von benutzerdefinierten Anwendungen ermöglicht, was es zur ultimativen All-in-One-Lösung für Ihre Elektronikprojekte macht.

Warum Red Pitaya wählen?

- **Vielseitigkeit in Reinkultur:** Ein Red-Pitaya-Board lässt sich an eine Vielzahl von Anwendungen anpassen, von Signalverarbeitung und Telekommunikation bis hin zu Robotik und IoT-Projekten. Das modulare Design bedeutet, dass Sie es immer an Ihre spezifischen Anforderungen anpassen können.
- **Kostengünstige Innovation:** Verabschieden Sie sich von teuren, spezialisierten Geräten. Ein Red-Pitaya-Board bietet High-End-Funktionen, ohne Ihr Budget zu sprengen und macht fortschrittliche Elektronik für jedermann zugänglich.
- **Portabilität und Komfort:** Dank der kompakten Kreditkartengröße eines Red-Pitaya-Boards können Sie Ihr Labor überall hin mitnehmen. Ob Sie nun unterwegs sind oder am Schreibtisch sitzen, Red Pitaya ist Ihr ständiger Begleiter.
- **Open-Source-Community:** Schließen Sie sich einem globalen Netzwerk von Enthusiasten und Fachleuten an, die Anwendungen, Tutorials und Ideen austauschen. Dank der umfangreichen Dokumentation und des Supports fühlen Sie sich nie verloren.



Wir stellen das *Red Pitaya Click Shield* vor: Entfesseln Sie unendliche Möglichkeiten

Als ob Red Pitaya nicht schon vielseitig genug wäre, hebt das neue **Red Pitaya Click Shield** es auf ein völlig neues Niveau. Mit dieser innovativen Erweiterungsplatine können Sie über **1.000 verschiedene Click-Boards™** von MikroElektronika anschließen und so eine Welt der Möglichkeiten eröffnen. Diese Plug-and-Play-Module umfassen alles von Sensoren und Kommunikationsschnittstellen bis hin zu Motorsteuerungen und Displays. Mit dem Red Pitaya Click-Shield war es noch nie so einfach, neue Funktionalitäten in Ihre Projekte zu integrieren.

Was ist das *Red Pitaya Click Shield*?

Das Red Pitaya Click-Shield fungiert als Brücke zwischen Red Pitaya und dem umfangreichen Angebot an Click-Boards™. Es ermöglicht eine nahtlose Integration, ohne dass eine komplexe Verkabelung oder fortgeschrittene technische Kenntnisse erforderlich sind. Bringen Sie das Red Pitaya Click-Shield einfach an Ihrem Red Pitaya an, schließen Sie die von Ihnen ausgewählten Click-Boards™ an, und schon sind Sie bereit für Innovationen.

Wie kann es Ihre Projekte unterstützen?

- **Unendliche Anpassungsmöglichkeiten:** Stellen Sie sich vor, Sie könnten mit minimalem Aufwand jede gewünschte Funktionalität hinzufügen. Müssen Sie Umgebungsbedingungen überwachen, Motoren steuern oder drahtlose Kommunikation implementieren? Dafür gibt es ein Click-Board™!
- **Benutzerfreundlichkeit:** Das Red Pitaya Click-Shield wurde für eine nahtlose Integration entwickelt und macht komplizierte Konfigurationen überflüssig. Keine Lötarbeiten oder komplizierte Verdrahtung - einfach das Click-Board™ einstecken und loslegen.
- **Kostengünstige Erweiterung:** Erweitern Sie die Fähigkeiten Ihres Red Pitaya, ohne in mehrere Spezialgeräte zu investieren. Das Red Pitaya Click-Shield bietet eine budgetfreundliche Möglichkeit, den Umfang Ihres Projekts zu erweitern.
- **Unterstützung durch die Community:** Mit einer großen Benutzer-Community und einer umfangreichen Dokumentation stehen Ihnen alle Ressourcen zur Verfügung, die Sie für Ihren Erfolg benötigen. Tauschen Sie Ideen aus, lassen Sie sich inspirieren, und holen Sie sich Hilfe, wenn Sie sie brauchen.

Ulrich Drees — 240590-02

Besuchen Sie uns auf der Messe electronica 2024, Stand A3/572!
vom 12. bis 15. November in München

Die 100 % durchgängige Flussmittelseele

Ein Beitrag von Almit

Schneller, höher, weiter: Die Elektronikfertigungsbranche befindet sich in einem stetigen Wandel. Die Anforderungen an die Fertigung ändern sich rasant, Schwerpunkte werden neu gesetzt und neue Märkte müssen erschlossen werden. Um hier als Hersteller Schritt zu halten, braucht es höchste Qualitätstandards und das Bestreben, den Bedürfnissen der Kunden mit innovativen Lösungen zu begegnen, welche nicht nur gegenwärtige Anforderungen erfüllen, sondern auch ganz neue Möglichkeiten und Chancen für die Zukunft eröffnen. Almits elaborierte Forschungsarbeit legt die Basis für die einzigartige Qualität des Lötdrahtportfolios. Hinzu kommt individuelle Entwicklungsarbeit, um maßgeschneiderte Produkte für jede Anforderung anzubieten.

Almits Qualitätsgarant: die 100 % durchgängige Flussmittelseele

Herkömmliche Lötdrähte haben häufig das Problem, dass die Flussmittelseele aufgrund einer mangelhaften Produktionstechnik durch Lufteinschlüsse unterbrochen ist und die Seele eine hohe Varianz beim Flussmittelanteil aufweist. Dies führt in der Anwendung zu einer minderen Qualität der Lötstelle. Almit-Lötdrähte verfügen hingegen über eine 100 % durchgängige Flussmittelseele ohne jegliche Art von Lufteinschlüssen und nur einer minimalen Varianz beim Flussmittelanteil (**Bild 1**). Dieses Qualitätsversprechen kann Almit für alle Lötdrähte gewährleisten, selbst für seine extrem dünnen Hochleistungsdrähte mit einem Durchmesser von bis zu 0,08 mm. Diese werden vor allem in den Bereichen Elektronik, Medizintechnik, Automobilindustrie und Luft- und Raumfahrt eingesetzt und eröffnen durch den geringen Durchmesser bei gleichbleibend höchster Qualität völlig neue Möglichkeiten in der Miniaturisierung.

Almit fokussiert sich nicht nur auf aktuelle Marktanforderungen, sondern möchte im Hinblick auf die Zukunft allen potenziell auftretenden Herausforderungen zuvorkommen. Daher setzt Almit sich bei der Produktentwicklung immer wieder eigene Standards, welche Industriestandards übertreffen. So auch in der Flussmittelentwicklung: Der Flussmittelanteil bewegt sich bei Almit mit einer nur minimalen Varianz und übertrifft dabei den Industriestandard: Bei einem P3-Draht darf sich der Flussmittelanteil laut Industriestandard zwischen 2,7 % und 3,9 % bewegen. Almit setzt sich erheblich höhere Standards als die Industrie: P3-Drähte von Almit erzielen mit einem Flussmittelanteil zwischen 3,1 % und 3,5 % eine wesentlich geringere Varianz, was sich in dem folgenden Vergleich der Lötpunkte aus **Bild 2** widerspiegelt.

Höhere Lötspitzenstandzeit für langfristige Kostenreduktion

Wenn es um die Kosten in der Elektronikfertigung geht, ist das Thema Lötspitzenverschleiß ein kritischer Faktor. Almit bietet

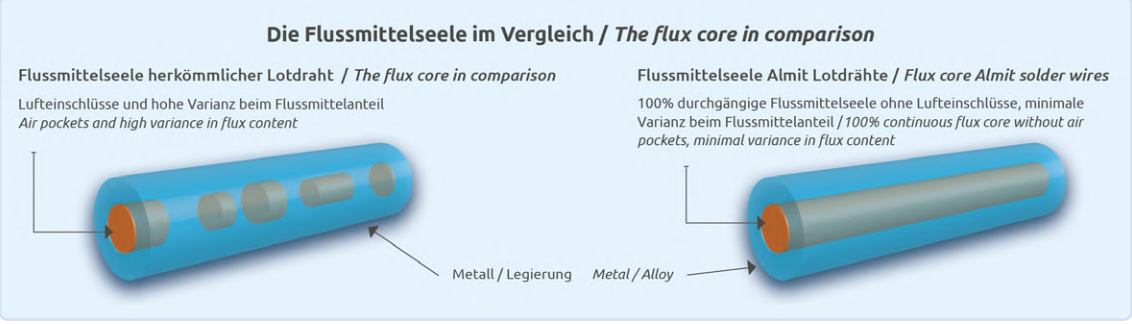
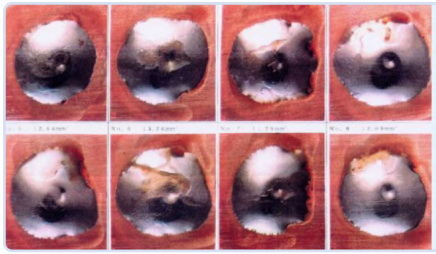
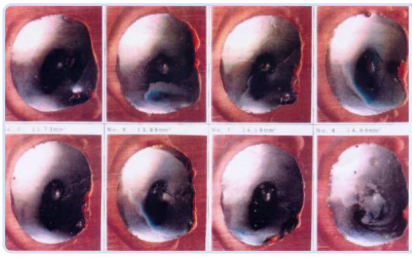


Bild 1. Almit-Lötdrähte verfügen über eine 100 % durchgängige Flussmittelseele.



Lötpunkte **herkömmlicher Lotdraht** mit Flussmittelseele mit Lufteinschlüssen
Soldering points conventional solder wire with flux core with air pockets



Lötpunkte **Almit-Lotdraht** mit 100% durchgängiger Flussmittelseele ohne Lufteinschlüsse
Solder points Almit solder wire with 100% continuous flux core without air pockets

Bild 2. Lötdrähte von Almit erzielen mit einem Flussmittelanteil zwischen 3,1 % und 3,5 % eine sehr geringe Varianz.

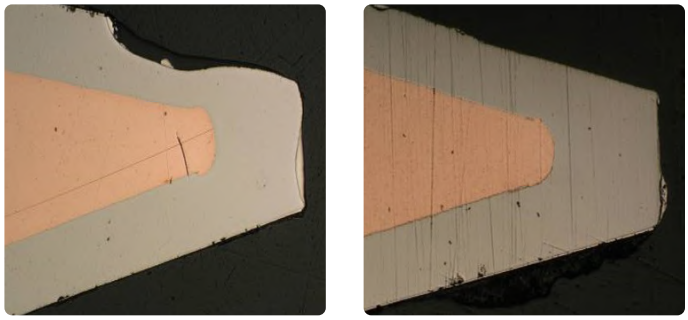


Bild 3. Ergebnis nach 20.000 Lötungen: Lötspitzenverschleiß eines herkömmlichen Lötdrahts (links) und Lötspitzenverschleiß eines Almit-Lötdrahts LFM-23 S (rechts).

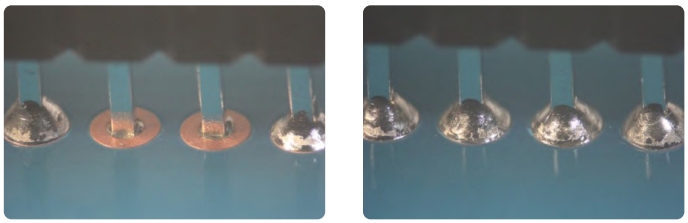


Bild 4. Ergebnis des Through-Hole-Lötens eines herkömmlichen Lötdrahts (links) und eines Almit-Lötdrahts SRS-ZL (rechts).

zukunftsweisende Lösungen an, um die Kosten im Griff zu behalten: So reduzieren die Lötdrähte der S-Linie von Almit durch einen innovativen Zusatz in der Legierung die Oxidation und minimieren damit den Eisenabtrag an der Lötspitze. Im Vergleich zu einer herkömmlichen Legierung erhöht sich die Lötspitzenstandzeit um bis das 5-fache und trägt so dazu bei, die Kosten in der Fertigung zu reduzieren (**Bild 3**).

Das Beste aus zwei Welten: Der halogenfreie Lötdraht SRS-ZL mit L1-Charakteristika

Ein neues innovatives Produkt in Almits Hochleistungsportfolio ist der Lötdraht SRS-ZL. Als halogenfreier Draht wird er der IPC-Klassifizierung L0 zugeordnet und überzeugt dennoch mit vielen Eigenschaften eines L1-Drahtes, wie einem außergewöhnlich schnellen Benetzungsverhalten und einem sehr guten Fließverhalten. Mit dieser Kombination ist er besonders gut für Automotive-Anwendungen geeignet. Die hervorragenden Eigenschaften des SRS-ZL beweisen sich auch beim Through-Hole Schlepplöten. Bei Through-Hole Techniken beträgt die Mindestfüllung des Durchsteigers 75 %, um im 3-Klassen-Produktsystem von IPC die höchste Klassifizierung zu erreichen und damit zur Fertigung von Hochleistungselektronik zugelassen zu werden. Hochleistungselektronik bezeichnet hierbei Produkte, deren kontinuierliche Funktionsfähigkeit und Hochleistung unabdingbar ist, wie zum Beispiel lebenserhaltende oder andere kritische Systeme. Almits Lötdraht SRS-ZL erreicht nicht nur die geforderten 75 %, sondern weist eine 100 %ige Füllung des Durchsteigers auf – eine einzigartige Performance, besonders für einen halogenfreien Lötdraht (**Bild 4**). Eine große Herausforderung im Bereich Löten sind Flussmittelspritzer. Als Bindemittel im Flussmittel wird Rosin verwendet, ein Harz, das übrigbleibt, wenn man aus dem von Nadelhölzerstämmen abgesonderte Terpentin durch Destillieren das flüchtige Terpentinöl abscheidet. Im verwendeten Harz ist eine Restfeuchte enthalten, der Hauptgrund für das Spritzen des Flussmittels. Almit betreibt eine eigene Flussmittelentwicklung, um für jede Applikation, abhängig von den thermischen Aufheizbedingungen, das entsprechende Flussmittel bereit zu stellen. Hierbei wird ein aufwendiges Fertigungsverfahren angewandt, um die natürliche Restfeuchte im Flussmittel auf ein Minimum zu reduzieren. Der dadurch erreichte Qualitätsvorsprung spiegelt sich auch in den Charakteristika des SRS-ZL wider, denn er überzeugt mit besonders wenig Flussmittelspritzern, wie in **Bild 5** gezeigt wird.

Wünschen Sie eine technische Beratung? Wir freuen uns auf Ihre Kontaktaufnahme über *technicalsupport@almit.de* !

240604-02

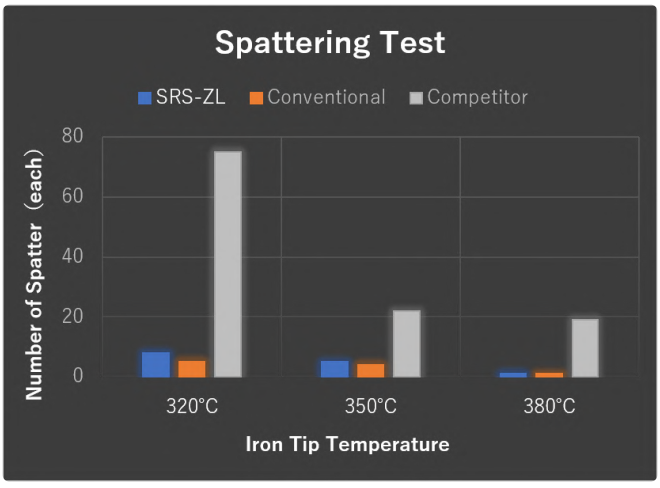


Bild 5. Der Lötdraht SRS-ZL weist besonders wenig Flussmittelspritzer auf.

Siglent stellt seine neue Vektornetzwerk-Analysator-Plattform SNA6000A vor

Ein Beitrag von Siglent

Siglent hat seine neue SNA6000A-Vektornetzwerk-Analysatorserie vorgestellt, die mit beeindruckenden Spezifikationen und einer Vielzahl leistungsstarker Funktionen den hohen Anforderungen moderner HF-Designs gerecht wird. Die Serie umfasst acht Modelle mit Bandbreiten von 13,5 GHz und 26,5 GHz, die jeweils in 2-Port- und 4-Port-Konfigurationen erhältlich sind. Zudem stehen diese Modelle sowohl in einer Standardversion als auch in einer erweiterten Version (SNA61xxA) mit Direct Receiver Access (DRA) zur Verfügung, was die Flexibilität und Leistungsfähigkeit des Analysators insbesondere bei komplexen Anwendungen deutlich erhöht.

Bild 1. Der SNA6024A Vektornetzwerk-Aanalysator.

Ein hoher Dynamikbereich ermöglicht präzisere und verlässlichere Messungen, die besonders in Forschung, Entwicklung und Produktion von großer Bedeutung sind. Der SNA6000A überzeugt mit einem Dynamikbereich von über 135 dB und eignet sich damit hervorragend für die detaillierte Analyse schwacher Signale, selbst in Gegenwart starker Signale (**Bild 1**). Dies macht ihn zur idealen Lösung für Messungen wie die von Filtern mit geringem Einfügungsverlust und hoher Sperrdämpfung. Zudem hilft der große Dynamikbereich, Signalverzerrungen zu minimieren, die Signalintegrität zu verbessern und die Kalibriergenauigkeit zu erhöhen, insbesondere in Fällen, in denen externe Einflüsse wie Kabel oder Adapter reduziert werden müssen.

In der Praxis lässt sich durch Kalibrierung nicht immer jeder externe Einfluss vollständig ausschalten. Daher ist es entscheidend, über geeignete Werkzeuge zu verfügen, um Störungen durch Kabel oder Testbuchsen zu minimieren. Die SNA6000A-Serie bietet dafür Funktionen wie eine anpassbare Referenzebene, die Entfernung von Adaptern sowie Einbettungs- und Entfernungsoptionen, um diese Herausforderungen effizient zu bewältigen.

Die Funktionen der Zeitbereichsreflektometrie (TDR) erweitern den VNA um die Möglichkeit, Signalpfade, Leitungen und Kabel umfassend zu diagnostizieren und zu charakterisieren. Diese Funktionen können dem SNA6000A durch die Optionen SNA6000-TDA und SNA6000-TDR hinzugefügt werden. Mit der TDR-Option lassen sich zudem Augendiagramme erstellen, die für die Bewertung der Signalintegrität in der digitalen Hochgeschwindigkeitskommunikation von großer Bedeutung sind (**Bild 2**). Durch die Kombination von TDR und VNA wird auch eine Jitter-Analyse

ermöglicht, die unerlässlich für die Untersuchung der zeitlichen Stabilität von Signalen ist – beides entscheidende Funktionen bei der Entwicklung von Hochgeschwindigkeits-Digitalanwendungen.
Zusätzlich kann der Analysator für gepulste Messungen aufgerüstet werden, was besonders bei der Charakterisierung von Hochfrequenzkomponenten unter realen Betriebsbedingungen, wie in Radar- und Kommunikationssystemen, vorteilhaft ist. Diese Methode erlaubt eine präzise Analyse von Komponenten mit kurzen Impulsen, eine genaue Bewertung schneller Schaltvorgänge und die Optimierung der Leistung in zeitkritischen Anwendungen.
Die Integration einer Spektrumanalysefunktion in einen Vektornetzwerkanalysator (VNA) erweitert die Möglichkeiten erheblich, besonders bei der Entwicklung und Prüfung von Hochfrequenzverstärkern, Oszillatoren und Kommunikationssystemen. Diese Funktion ist als Option SNA6000-SA erhältlich und ermöglicht eine präzise Analyse von Harmonischen, Intermodulationsprodukten und anderen nichtlinearen Effekten. Gleichzeitig optimiert sie die Signalqualität und Bandbreitennutzung in Kommunikationsanwendungen. Die Kombination von VNA und Spektrumanalyse in einem Gerät bietet nicht nur Platz- und Kosteneinsparungen, sondern auch eine umfassendere Signalcharakterisierung. Diese erweiterte Messfunktionalität führt zu effizienteren Diagnosen und besseren Einblicken in das Verhalten von Hochfrequenzkomponenten und -systemen.
Neben diesen Funktionen stehen aktuell zwei weitere Optionen zur Verfügung: Zum einen die SNA6000-SMM, eine skalare Analyse von Mischern, die für die Messung an frequenzumsetzenden Bauteilen genutzt wird. Zum anderen die Materialanalyse-Option, die dem VNA ermöglicht, wichtige Parameter für elektronische Anwendungen zu ermitteln, insbesondere die Permittivität und Permeabilität von Materialien. Ein integrierter Formeleditor und ein Maskentest unterstützen Entwickler bei der Analyse von Testobjekten und beschleunigen die Auswertung. Der große 12-Zoll-Touchscreen lässt sich flexibel konfigurieren und ermöglicht eine übersichtliche Darstellung mehrerer Fenster mit unterschiedlichen Messungen.

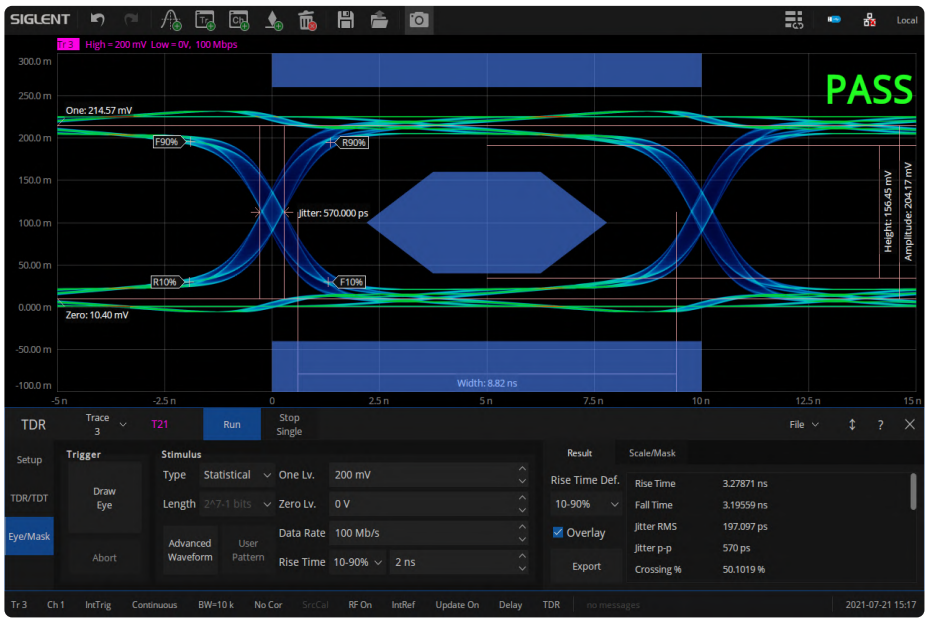


Bild 2. Die Funktionen der Zeitbereichsreflektometrie (TDR) erweitern den VNA um die Möglichkeit, Signalpfade, Leitungen und Kabel umfassend zu diagnostizieren und zu charakterisieren.

SNA6000A Vector Network Analyzer

- Frequenzbereich 100 kHz bis 13,5 GHz und 100 kHz bis 26,5 GHz.
- Bereich der IFBW 1 Hz bis 10 MHz.
- Dynamischer Bereich 135 dB.
- Einstellbereich des Ausgangspegels -55 bis +10 dBm.
- Standard Bias-Tee-Verbindung und Puls-Hardware.
- 4-Port-Modelle beinhalten eine standardmäßige zweite Quelle.
- Jumper / DRA (Source, Ref und Meas) standardmäßig bei SNA61xxA-Modellen.

Für die Charakterisierung großer HF-Netzwerke innerhalb eines umfassenden Multiport-Testsystems kann der SNA6000A mit der Siglent SSM5000A Switch Matrix Series kombiniert werden. Das entstandene System erfasst sequenziell S-Parameter an bis zu 24 Ports. Mit zahlreichen verfügbaren Matrix-Konfigurationen kann schnell ein maßgeschneidertes Testsystem entworfen werden, das im Vergleich zu konkurrierenden Lösungen einen außergewöhnlichen Mehrwert bietet. Die SSM5000A-Serie wird über USB oder LAN mit dem Analysator verbunden. Der SNA6000A verfügt über eine automatische Matrixerkennung und Portzuweisung. Benutzer können somit das System problemlos als vollständigen Multiport-Vektornetzwerk-Analysator betreiben. Die VNA-Firmware hat alle Funktionen in der Standardkonfiguration integriert.
Zusammenfassend bietet die SNA6000A-Serie von Siglent eine leistungsstarke Lösung für die zunehmend anspruchsvollen Herausforderungen der Hochfrequenztechnik. Die Serie überzeugt durch herausragende Grundspezifikationen, flexible Anwendungen und nützliche Erweiterungsmöglichkeiten und stellt eine vielseitige, leistungsstarke und benutzerfreundliche Lösung für moderne Mess- und Analyseanforderungen dar. Mehr Infos finden Sie unter [1].

240588-02

WEBLINK

[1] SNA6000A Vector Network Analyzer: https://www.siglenteu.com/vector-network-analyzer/sna6000a-vector-network-analyzer

EURO CIRCUITS

HDI der Mittelklasse

Ein neuer ökonomischer PCB Pooling Service für hochpolige BGAs

Ein Beitrag von Eurocircuits

Manchmal gibt es das Bauteil, das wir unbedingt für unser Projekt verwenden möchten, nur in einem Fine-Pitch-BGA-Gehäuse. Das bedeutet, dass unser Design die Grenze der Standardleiterplattentechnik in den HDI-Bereich überschreitet. Technisch gesehen bedeutet HDI *High Density Interconnect* und praktisch, dass wir mit kleineren Abständen und feineren Leiterbahnen layouten können. Außerdem können wir Microvias verwenden – Durchkontaktierungen mit kleineren Pads und kleineren Durchmessern, als es normalerweise mit mechanischen Bohrungen möglich ist.

HDI ermöglicht die Miniaturisierung. Das ist großartig, kann aber lästig sein, wenn sie uns durch ein einziges Bauteil auf die gesamte Leiterplatte „erzwungen" wird, die sich dadurch verteuert. Bei Eurocircuits haben wir eine „Mittelklasse"-Lösung, mit der man sowohl das Bauteil als auch die Kosten unter einen Hut bringen kann. Unser HDI-Pool (**Bild 1**), ein 8-Lagen-Aufbau, behält die Leiterbildklassen der Standardtechnologie bei und fügt Mikrovias zwischen

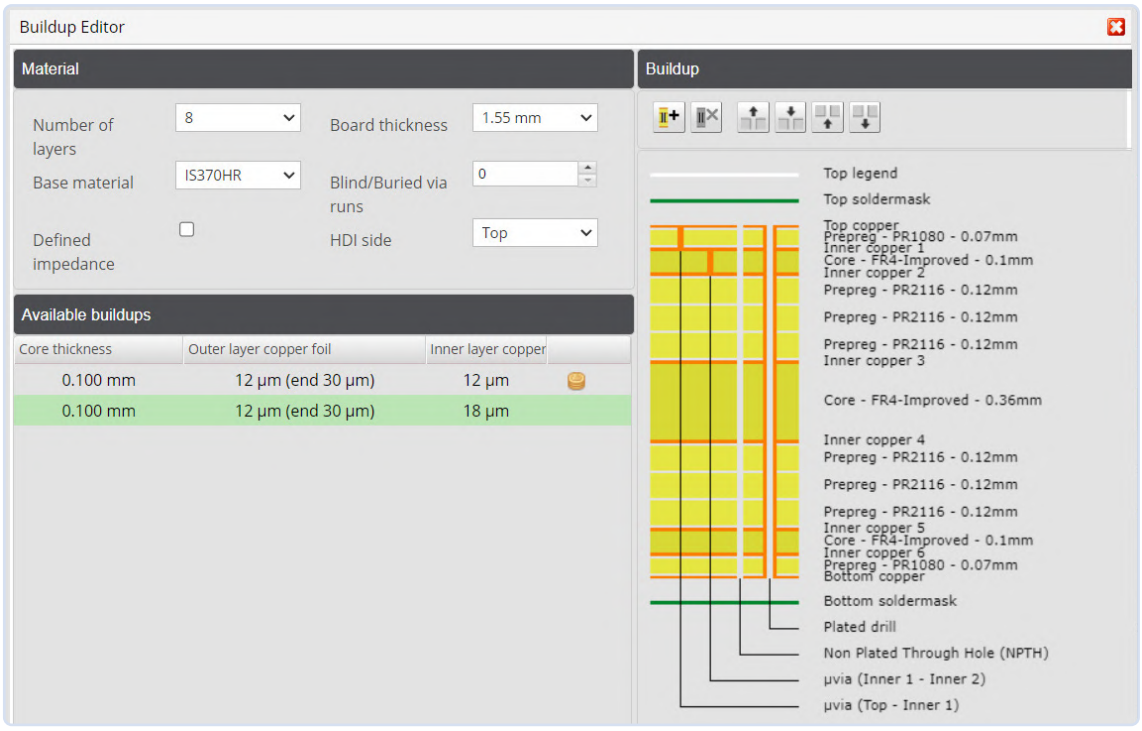


Bild 1. Der 8-lagige Multilayer-Aufbau im HDI-Pool.

Pattern and hole size classification (µm) — Revision 20242808-1

Pattern classification		7	8	9
Copper clearance, any layer	≥	125	100	90
Pad diameter, outer layers Add this value to N/PTH diameter	≥	+350	+300	+300
Pad diameter, inner layers Add this value to N/PTH diameter	≥	+350	+350	+300
Clearance from PTH, inner layers From hole edge	≥	250	250	250
Clearance from NPTH, inner layers From hole edge	≥	200	200	200
HDI microvia pad diameter Available only for layers 1-2 and 2-3	≥	280	230	210
HDI microvia diameter Available only for layers 1-2 and 2-3	=	100	100	100

Hole diameter classification		A	B	C	D	E
Plated through-hole (PTH) diameter	≥	500	350	250	150	100
Non-plated through-hole (NPTH) diameter	≥	600	450	350	250	200
Max PCB thickness (mm)	=	3.20	3.20	2.40	2.00	1.60

Bild 2. Die Parameter unserer Leiterbildklassen, für die HDI-Pool verfügbar ist (beachten Sie, dass Klasse 9 nicht poolbar ist).

den Lagen 1-2 und 2-3 oder 8-7 und 7-6 hinzu. Dadurch können unsere Kunden diese Fine-Pitch-BGAs entflechten und die Kosten sind überschaubar, weil HDI nur auf einen kleinen Bereich und zwei Microvia-Lagen beschränkt ist.

In der Praxis

Was heißt das in der Praxis? Betrachten wir die Leiterbildklasse 7 mit der Bohrklasse E in **Bild 2**. Der kleinstmögliche Pad-Durchmesser beträgt 0,45 mm (0,1 + 0,35 mm). Das passt nicht in die meisten Fine-Pitch-BGA-Pads. Wenn wir jedoch dieselbe Klasse zusammen mit dem HDI-Pool verwenden, beträgt der kleinste Durchmesser 0,28 mm und passt! PCB-Designer können damit Vias in der Mitte von BGA-Pads platzieren, ohne die Pads über die Empfehlungen des Herstellers hinaus vergrößern zu müssen. Die kleineren Microvia-Pads ermöglichen zudem Dogbone-Anschlüsse.

Es ist unmöglich, alle BGA-Pin-Arrays und ihre Pin-Konfigurationen zu berücksichtigen, um festzustellen, welches Bauteil geroutet werden kann und welches nicht. Trotzdem haben wir unsere Pool-Parameter so konfiguriert, dass vollständige 8×8-Arrays für BGAs bis zu 0,4 mm Pitch vollständig geroutet werden können. **Bild 3** zeigt ein Beispiel für ein vollständig aufgefächertes 8×8-Bauteil mit 0,4 mm Raster. Selbstverständlich sind auch größere Arrays möglich, und alles hängt von der Array-Größe, der Pin-Konfiguration und der Art der Verwendung dieser Pins ab. In vielen Gehäusen gibt es No-Connect-Pins, und in den meisten Designs werden nicht alle Pins des Mikrocontrollers oder Prozessors verwendet. Das kann das Entflechten großer BGA-Arrays mit nur zwei Microvia-Lagen erleichtern.

Jetzt sind Sie an der Reihe! Laden Sie Ihr Design in unseren Visualizer [1] hoch und prüfen Sie es auf Fertigbarkeit! Wie immer freuen wir uns über Ihr Feedback, wie dieser Service Ihre Arbeit unterstützt.

240593-02

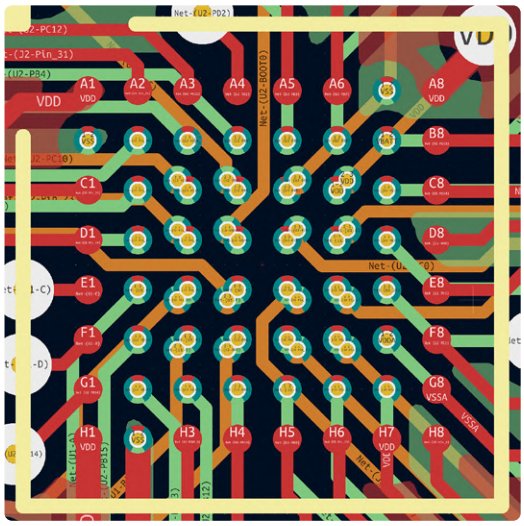


Bild 3. Ein Beispiel für ein Fan-out eines STM32F412 in einem WLCSP64-Gehäuse mit 0,4 mm Pitch. Die erste BGA-Reihe wird auf der obersten Schicht (rot) verlegt, die zweite Reihe auf der zweiten Schicht (grün) unter Verwendung von L1-L2-Microvias in der Pad-Mitte. Die dritte und vierte Reihe werden auf der dritten Schicht (orange) unter Verwendung von L1-L2 und L2-L3 versetzten (staggered) Vias verlegt.

WEBLINK

[1] https://be.eurocircuits.com/shop/orders/configurator.aspx?loadfrom=web&service=hdipool&deliverycountry=de&invcountry=de&country=de&lang=de

MIKROE
Time-saving embedded tools

Ferngesteuerte IoT-Entwicklung

Die einzige Lösung für Fernunterricht und Entwicklung in der Embedded-Industrie

Ein Beitrag von MIKROE

MikroElektronika (MIKROE), ein Pionier in der Embedded-Industrie, hat eine bahnbrechende Innovation namens Planet Debug eingeführt – die erste Hardware-as-a-Service-Plattform der Branche. Planet Debug wurde entwickelt, um Zeit und Kosten zu sparen sowie volle Design-Flexibilität zu ermöglichen. Es erlaubt Entwicklern, Studenten und Institutionen, eingebettete Systeme aus der Ferne zu entwerfen, zu entwickeln und zu debuggen.

Bild 1. Planet Debug-Fernstationen mit über 130+ Entwicklungsboards, darunter MCU-Karten, Peripheriegeräte und Displays – teure Hardware ist nicht erforderlich.

Eine der größten Herausforderungen für Entwickler von eingebetteten Systemen besteht darin, Hardwarekomponenten zu beschaffen, darauf zu warten und diese zusammenzubauen. Mit Planet Debug wird dieses Problem gelöst. Anstatt teure Hardware zu kaufen, können Entwickler nun Zeit auf einer der Remote-Stationen von Planet Debug reservieren (**Bild 1**). Diese Stationen sind mit über 130 Entwicklungsboards ausgestattet, darunter Kombinationen aus Mikrocontroller-Karten (MCU), Peripherie-Boards und Display-Konfigurationen. Der Prozess ist einfach: Entwickler wählen die benötigte Hardware-Konfiguration aus und können ihre Anwendungen innerhalb eines Tages über die integrierte Entwicklungsumgebung (IDE) NECTO Studio von MIKROE fernentwickeln. NECTO Studio ermöglicht es den Entwicklern, Echtzeitbilder der tatsächlichen Hardware zu sehen, die ihren Code ausführt, sodass sie sicher sein können, dass sie mit realer Hardware und nicht mit Simulationen arbeiten.

Für viele Entwickler bedeutet diese Flexibilität, dass sie mit verschiedenen Hardware-Konfigurationen experimentieren können, ohne sich zu einer teuren Anschaffung verpflichten zu müssen. Planet Debug ermöglicht es ihnen, „vor dem Kauf zu testen“, was die Eintrittsbarrieren für Neulinge im Bereich eingebetteter Systeme erheblich senkt.

Die Vorteile von Planet Debug für die Bildung

Die Plattform ist besonders wertvoll für Studenten und Universitäten, da sie Fernunterricht und praktische Erfahrungen in der Arbeit mit eingebetteten Systemen ermöglicht, ohne dass eigene Hardware erforderlich ist. In vielen Bildungseinrichtungen sind die Ressourcen begrenzt, und nicht jeder Student hat Zugang zu teuren Entwicklungskits. Mit Planet Debug können Universitäten und Studenten diese Remote-Ressourcen nutzen und so praktisches Lernen von überall auf der Welt ermöglichen. Zum Beispiel kann ein Student in den USA Zeit auf einem Entwicklungsboard in Mexiko reservieren und sein Projekt aus der Ferne entwickeln, während er die Ergebnisse in Echtzeit sieht. Die Möglichkeit, Hardware aus der Ferne zu nutzen, Code zu testen und Systeme von jedem Standort aus zu debuggen, macht es zu einer perfekten Lösung für Online-Kurse, insbesondere da Fernunterricht zur neuen Norm geworden ist. Diese Flexibilität fördert auch die internationale Zusammenarbeit, da Studenten und Lehrende ohne physische Einschränkungen an gemeinsamen Projekten arbeiten können.

Aquakultur in Mexiko erkunden – Lernen außerhalb des Klassenzimmers

Eines der herausragenden Merkmale von Planet Debug ist seine globale Zugänglichkeit. Derzeit gibt es Setups in Europa, den USA (Minnesota) und Mexiko, und es gibt Pläne, in andere Regionen, einschließlich

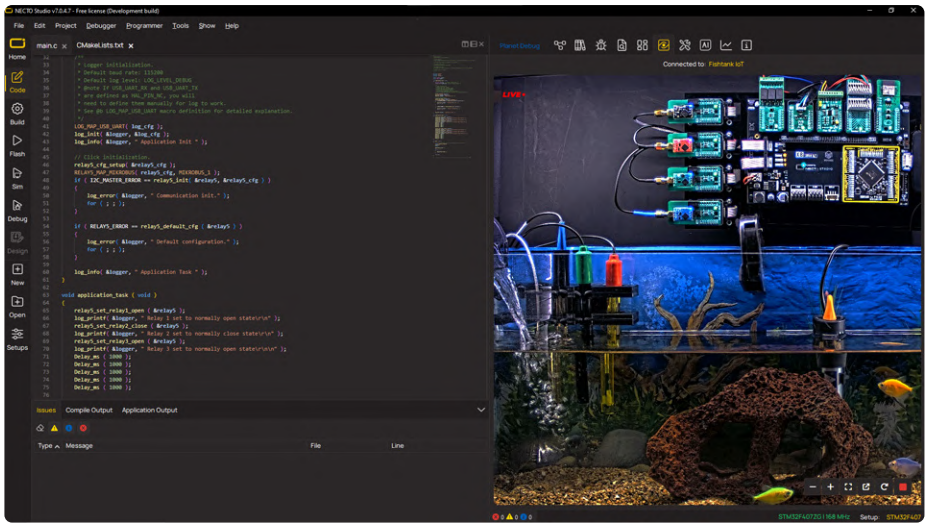


Bild 2. Die Planet Debug-Station in Mexiko bietet eine einzigartige Funktion: Echtzeitüberwachung eines Fischbeckens neben Live-Programmierung.

Asien, zu expandieren. Besonders die Planet Debug-Station in Mexiko bietet etwas Einzigartiges: eine Echtzeitansicht von Fischen, die im Wasserbecken schwimmen! Stellen Sie sich vor, Sie könnten die Bewegungen des Meereslebens beobachten, während Sie an Ihren eingebetteten Systemdesigns arbeiten (wie in **Bild 2** gezeigt). Diese Einrichtung eignet sich perfekt für Studien der Meeresbiologie, Umweltüberwachung oder einfach, um dem Lernen oder Designprozess eine immersives Erfahrung hinzuzufügen.

Durch diese innovativen Setups können Studenten und Entwickler mit realen Anwendungen arbeiten und gleichzeitig ihre Fähigkeiten in eingebetteten Systemen weiterentwickeln, was Planet Debug nicht nur zu einem Werkzeug für technische Entwicklungen, sondern auch für interaktives, praxisnahes Lernen macht.

Planet Debug: Eine Lösung für Dienstleistungsunternehmen im Bereich Design

Dienstleistungsunternehmen im Bereich Design, insbesondere solche, die in der Prototypenentwicklung und Produktentwicklung tätig sind, profitieren erheblich von Planet Debug. Die Möglichkeit, schnell verschiedene Hardwarekombinationen zu konfigurieren und zu testen, ohne mehrere Entwicklungskits kaufen zu müssen, bringt einen entscheidenden Vorteil, da die Betriebskosten reduziert werden. Die Markteinführungszeit ist für Unternehmen entscheidend, und Planet Debug hilft, den Entwicklungsprozess zu beschleunigen, indem es sofortigen Zugriff auf Hardware bietet, ohne die üblichen Verzögerungen bei Versand und Einrichtung. Da sich Produktanforderungen unter Umständen ändern, können Ingenieure ihre Entwicklungsumgebung schnell und aus der Ferne neu konfigurieren und so auf neue Spezifikationen oder Marktanforderungen reagieren, ohne ihr Setup überarbeiten zu müssen. Diese Flexibilität ist in einer Branche, in der Agilität der Schlüssel zum Erfolg ist, von unschätzbarem Wert.

Chip-Knappheit überwinden

Der weltweite Mangel an Halbleitern betraf viele Branchen und hat zu Produktions- und Entwicklungsverzögerungen geführt. Planet Debug bietet jedoch eine einzigartige Lösung für dieses Problem. Da Entwickler mit Remote-Hardware arbeiten, beeinflusst die Chip-Knappheit ihre Fähigkeit nicht, weiterhin Anwendungen zu entwickeln und zu testen. Die Plattform gewährleistet die ständige Verfügbarkeit von Hardware, unabhängig von Unterbrechungen in der Lieferkette. Dieser Vorteil gilt auch für Bildungseinrichtungen, in denen eingeschränkte Ressourcen den Fortschritt der Studenten behindern können. Mit Planet Debug sind Universitäten und Studenten nicht mehr auf die Verfügbarkeit von Hardware angewiesen, sodass Lernen und Innovationen ohne Unterbrechung fortgesetzt werden können.

Zukünftige Expansion und globale Zugänglichkeit

Derzeit sind Planet Debug-Stationen an mehreren Standorten verfügbar, darunter sind der Hauptsitz von MIKROE, verschiedene Universitäten in Europa sowie Einrichtungen in Minnesota, USA, und Mexiko. Es gibt Expansionspläne nach Asien, was die globale Reichweite der Plattform weiter ausbaut. Der Dienst steht Benutzern weltweit zur Verfügung und macht ihn zu einer wirklich globalen Lösung für das Design eingebetteter Systeme. Nebojsa Matic, CEO von MIKROE und Gründer von Planet Debug, fasst es perfekt zusammen: „Hardware-as-a-Service ist die Zukunft des Designs. Es ist schwer für die Menschen, das jetzt zu begreifen, weil es so viele Teile des Puzzles gibt: die Click-Peripherie-Boards und SiBRAIN-MCU-Karten, die auf Standardsockeln basieren; die Fusion-Entwicklungsboards, CODEGRIP und NECTO. Aber das logische Endziel für uns war es immer, sie in der Planet Debug-Plattform zu kombinieren. Es wird das Design eingebetteter Systeme revolutionieren."

Eine neue Ära für Embedded Design und Fernunterricht

Planet Debug stellt einen bedeutenden Wandel in der Entwicklung, dem Design und der Lehre eingebetteter Systeme dar. Sein einzigartiges Hardware-as-a-Service-Modell ermöglicht beispiellose Flexibilität, Kosteneinsparungen und Zugänglichkeit für Entwickler, Studenten und Universitäten weltweit. Durch die Beseitigung der Notwendigkeit teurer Hardwarekäufe und den Zugang zu hochmodernen Entwicklungswerkzeugen aus der Ferne hat MIKROE eine Plattform entwickelt, die es den Nutzern ermöglicht, sich auf Innovation und Kreativität zu konzentrieren, anstatt sich um Logistik und Hardwarebeschränkungen zu kümmern. Für Studenten und Universitäten ist es eine perfekte Lösung für Fernunterricht und praktische Erfahrungen, die sicherstellt, dass die Bildung mit den technologischen Fortschritten Schritt hält. Für Unternehmen ist es eine kostengünstige Möglichkeit, den Designprozess zu optimieren, die Markteinführungszeit zu verkürzen und wettbewerbsfähig zu bleiben. Und für Meeresbiologen oder jedes andere Gebiet, das Fernbeobachtung erfordert, eröffnet Planet Debug neue Möglichkeiten für Erkundung und Entdeckung. Die Zukunft des Embedded-Designs ist da – zugänglicher, flexibler und innovativer als je zuvor.

240594-02

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 Schichten der Leiterplatte sind in der Regel in Größe

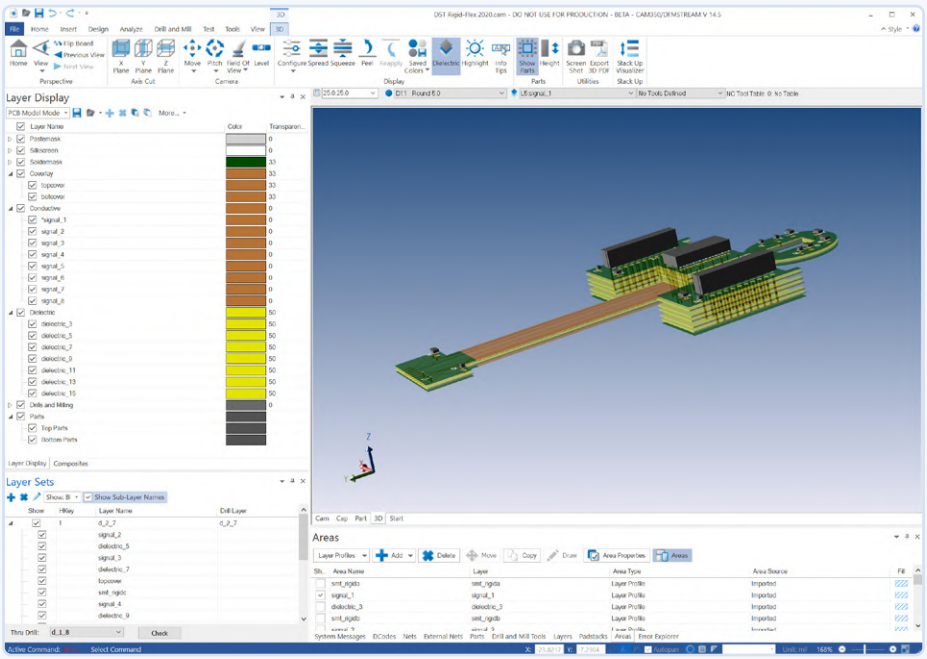


Bild 1. Ein Rigid-Flex-Entwurf in 3D mit separierten Schichten zur besseren Visualisierung.

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. Klebstofflos 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.

www.downstreamtech.com

240570-02

Aus dem Leben gegriffen

Mikrotechnophobie

Von Ilse Joostens (Belgien)

Mikrotechnophobie, Substantiv, aus dem Griechischen μικρός (mikrós, „klein“), τέχνη (technē, „Kunst, Geschick, Handwerk“) und φόβος (phobos, „Angst“). Eine Kombination aus „Mikrophobie“ oder der Angst vor kleinen Dingen wie Insekten, Miniaturen oder Mikroben und „Technophobie“, der Angst vor (neuer) Technologie. Mikrotechnophobie ist also die Angst vor kleinen technischen Objekten, speziell vor oberflächenmontierbaren Bauteilen.

Auch wenn das oben Gesagte nicht allzu ernst genommen werden sollte, ist die Angst vor dem Löten von oberflächenmontierbaren Bauteilen durchaus real. Selbst nach jahrelanger Erfahrung mit allen erdenklichen Werkzeugen, einschließlich einer Heißluft-Lötstation und eines Reflow-Ofens, und selbst nach dem Bau von Tausenden von Platinen mit SMDs, habe ich manchmal immer noch dieses ungute Gefühl beim Anblick einiger dieser Bauteile. Es scheint, dass die Hersteller eine sadistische Befriedigung daraus ziehen, diese Dinger immer kleiner zu machen, mit einer immer größeren Anzahl von Lötstellen pro Quadratmillimeter.

Angst vor kaltem Wasser

Unter Elektronikbastlern herrschen seit jeher vorgefasste Meinungen über SMDs. Sie können nicht von Hand gelötet werden, man kann mit ihnen nur schwer experimentieren, sie eignen sich nicht für den Bau von Prototypen, und es ist kaum möglich, irgendetwas zu testen und zu messen. Die Tatsache, dass viele DIY-Bausätze immer noch traditionell bedrahtete Bauteile enthalten und einige Anbieter damit werben, dass ihre Bausätze unter Vermeidung oberflächenmontierbaren Bauteile anfängerfreundlich sind, hilft nicht gerade dabei, solche Ängste zu überwinden.

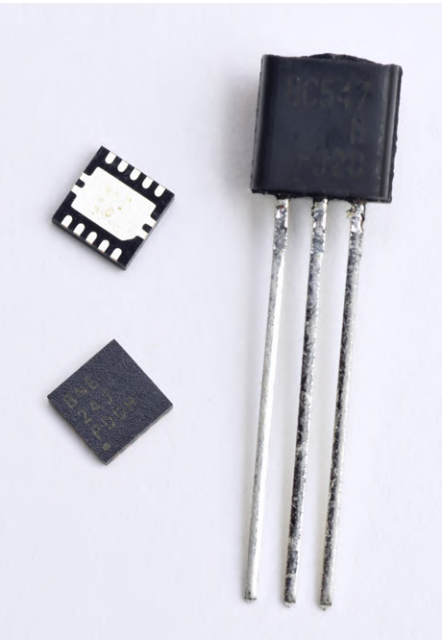


Bild 1. Ein extrem kleines SMD-IC, verglichen mit einem BC547 mit Anschlussdrähten, den wir alle sehr gut kennen und lieben. (Quelle: Ilse Joostens)

Durch die ständig wachsende Funktionalität von Smartphones werden die Hersteller von Bauteilen zu immer weiteren Miniaturisierungen angeregt. SMDs sind zwar im Allgemeinen schon recht klein (**Bild 1**), aber wenn man von den Bauteilen mit Nanopartikel-Ambitionen absieht, dann ist das manuelle Löten von SMDs gar nicht so schlimm, wie es aussieht [1]. Flussmittel ist Ihr Freund und mit ein paar geeigneten Lötkolbenspitzen, einer Pinzette und einer Lupe (mit oder ohne Beleuchtung) kommen Sie schon sehr weit. Ganz wichtig ist natürlich, dass man den Kopf wegdreht, wenn man niesen muss, damit die ganzen losen Bauteile nicht in alle Richtungen davonfliegen. Das lässt mich übrigens an eine frühere, nicht verwirklichte Fantasie denken, in der Dunkelheit mit einem Staubsauger durch die Regale meines Elektronikgroßhändlers zu streifen, ein klarer Fall von illegaler Beschaffung von Gratisware. Spaß beiseite, wenn Sie ernsthaft mit oberflächenmontierbaren Bauteilen arbeiten wollen, sollten Sie auch die Anschaffung einer Heißluftstation [2][3] in Betracht ziehen. Diese sind nicht nur recht erschwinglich, sondern eine solche Station kann neben der Arbeit mit SMDs auch für andere Aufgaben verwendet werden, zum Beispiel zum Schrumpfen von Schrumpfschläuchen, „Flammpolieren“ und Biegen von Acrylteilen.

Das Entlöten von SMDs funktioniert mit einer solchen Heißluftstation ebenfalls sehr gut und ist sogar viel einfacher als das Entlöten von bedrahteten Bauteilen, zumindest auf Platinen mit durchkontaktierten Löchern. Um beim Entlöten von Bautei-

len mit vielen Beinchen schneller voranzukommen, können Sie optional etwas Bismut-Lötpaste hinzufügen. Dadurch wird der Schmelzpunkt des Lötzinns herabgesetzt, so dass alles viel schneller geht. Reinigen Sie die Lötstelle anschließend gründlich mit einer Entlötlitze, und schon sind Sie fertig!

Prototypen bauen

Das Experimentieren und Bauen von Prototypen mit SMDs ist eigentlich recht einfach. Sie sind vielleicht nicht sofort mit dem traditionellen Breadboard kompatibel, aber passive Bauteile und sogar SOT-23-Transistoren eignen sich perfekt zum Löten auf den perforierten Prototyping-Boards. Für komplexere Bauteile wie ICs gibt es in der Regel eine üppige Auswahl an Adapterplatinen, Breakout-Boards und manchmal sogar Entwicklungsplatinen. Bei Bedarf können Sie das IC auch kopfüber auf sein Gehäuse kleben und mit dünnen Kupferlackdrähten an Ihre Schaltung anschließen [4]. Das nennt man die „Dead-Bug"-Methode (**Bild 2**), und dann muss man seine Entomophobie vielleicht etwas unter Kontrolle halten. Eingefleischte Bastler können natürlich auch die gesamte Schaltung mit CuL-Draht aufbauen [5].

Wenn es um das Testen und Prüfen geht, muss ich Sie korrigieren, wenn Sie gleich das Bild eines *Wafer-Probers* im Kopf haben. Sie können es geschickter anstellen und die Platine schon beim Entwurf mit Test- und Prüfpunkten im Hinterkopf entwerfen. Selbst mit ein paar scharfen Prüfspitzen kommt man sehr weit. Ich bitte um Entschuldigung, wenn Sie unter Aichmophobie leiden und sich jetzt unwohl fühlen. Anstelle von extrem scharfen Prüfspitzen können Sie auch spezielle Messspitzen für SMDs verwenden [6]. Empfehlenswert, wenn Sie häufig mit dieser Art von Schaltungen arbeiten.

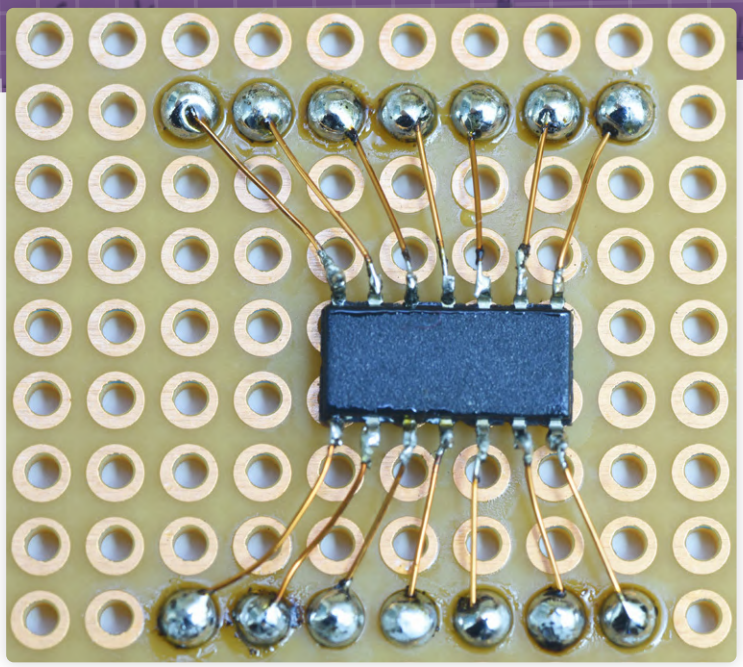


Bild 2. Die Dead-Bug-Methode in der Praxis. (Quelle: Ilse Joostens)

Megalotechnophobie, Helixaphobie und andere Ängste

Als Teenager hatte ich eine beträchtliche Angst vor Spulen, Helixaphobie [7] könnte man sagen - siehe das Titelfoto zu diesem Artikel. Es ist nicht so, dass ich in Ohnmacht fiel oder spontan zu hyperventilieren begann, wenn ich eine Spule erblickte, aber ich ignorierte im Allgemeinen Projektentwürfe, bei denen man Spulen selbst wickeln musste. Damals war es noch nicht möglich, Bauteile einfach online zu kaufen, und Dinge wie Ferritstäbe, Spulen- und Transformatorkerne waren im örtlichen Elektronikfachhandel nur sehr schwer zu bekommen. Ich denke, dass ich bei weitem nicht der Einzige mit dieser „Phobie" war.

Die Elektronik ist ein sehr breit gefächertes technisches und wissenschaftliches Fachgebiet mit zahlreichen Zweigen, in denen sich nicht jeder, auch nicht der erfahrene Elektronikingenieur, in allen gleich wohl fühlt. Üblicherweise ist es die etwas ältere Generation, die nicht so begeistert von all dem modernen digitalen Zeugs wie Mikrocontroller, FPGAs und Softwareentwicklung ist. Die Hochfrequenz- und Funktechnik kann recht komplex sein und ist nach wie vor von dieser Aura des Geheimnisvollen umgeben. Ich selbst fühle mich damit auch nicht so recht vertraut.

Auch die Hochspannungs- und Leistungselektronik ist ziemlich furchteinflößend, vor allem weil Fehler in diesem Bereich hart bestraft werden. Hier geht es meist um makroskopische SMDs (*Screw-Mounted Devices*), was zu dem Begriff „Megalotechnophobie" führt. Das heißt, die Angst vor großen technischen Dingen.

Wie auch immer, versuchen Sie, Ihre Ängste zu überwinden und haben Sie den Mut zu experimentieren, Sie werden es sich hinterher danken!

SG – 240432-02

WEBLINKS

[1] YouTube – TkkrLab: CyberSaturday: SMD for terrified beginners by Kliment Yanev: https://www.youtube.com/watch?v=xkVVXaF9smY
[2] ZD-8922 (2-in-1) SMD Heißluft-Lötstation: https://www.elektor.de/20141
[3] Quick 861DW Heißluft-Rework-Station (1000 W): https://www.elektor.de/20787
[4] Dangerous Prototypes: Fine pitch BGA deadbug soldering: https://t1p.de/4lzt5
[5] The Electronic Lives Manufacturing – presented by ChaN: Extreme Wiring on the Prototyping Board: https://www.youtube.com/watch?v=i5MNLTc7YhY
[6] Sensepeek 4019 PCBite Kit mit 2x 200 MHz und 4x SP10 Freihand-Tastkopf: https://www.elektor.de/19682
[7] Fun with Transistors by Max Robinson: Winding Coils: https://t1p.de/hbmvb

3D-Weihnachtsbaum

Eine 3D-Platine mit preiswertem 32-Bit-Mikrocontroller

Von André Araújo (Brasilien)

Die Nächte sind lang, und die glitzernden Auslagen in den Stadtzentren ziehen zwar die Blicke auf sich, können aber auch den Geldbeutel strapazieren. Den gleichen Glanz können Sie aber auch mit selbstgemachten Gegenständen und Geschenken erzielen. Und Ihr Bankkonto wird sich freuen, wenn Sie preiswerte Elektronik wie einen Mikrocontroller für nur 10 Cent verwenden. Wie wäre es also mit dieser modernen vorweihnachtlichen Beleuchtungsidee?

Im Oktober letzten Jahres startete das brasilianische Franzininho-Projekt [1], eine Open-Source-Hardware-Initiative, einen Weihnachtswettbewerb. Ziel war es, Platinenprojekte mit einem kostengünstigen Mikrocontroller zu erstellen, der mit einer Knopfzelle betrieben wird, wobei der Schwerpunkt auf einer geringen Stromaufnahme lag. Ein Basisprojekt wurde entworfen und auf Franzininhos GitHub [2] veröffentlicht. Zu den Mindestanforderungen gehörten:

- RISC-V-Mikrocontroller WCH CH32V003
- CR2032-Batterie
- LED-Animationen oder anderer grafischer Output
- Optional: Tasten, Summer usw.
- Platinen-Entwurf mit KiCad

Die Teilnehmer wurden ermutigt, das Projekt weiterzuentwickeln und ihre eigenen Versionen zu entwerfen und im Idealfall ihre Platinen herzustellen. Meine Idee war eine Platine in Form eines Weihnachtsbaums, die kreuzweise zu einem 3D-Gerät zusammengebaut wird, das entweder als eigenständige Dekoration oder als Baumschmuck dienen kann.

Der Mikrocontroller

Mit den Fortschritten in der Halbleitertechnologie bringen die Hersteller von Mikrocontrollern jetzt neuere, erschwinglichere 32-Bit-Versionen auf den Markt, die mit älteren 8-Bit-Mikrocontrollern konkurrieren - und diese häufig ersetzen. Chips, die auf dem ARM Cortex-M0+-Kern basieren, wie die STM32C0-Serie von STMicroelectronics, die LPC800- und MCX-C-Serie von NXP oder der RP2040 von Raspberry Pi veranschaulichen diesen Trend. Der chinesische Hersteller WCH, der für seine WCH340 USB/UART-Transceiver [3] bekannt ist, hat kürzlich mit der CH32V-Serie eine neue Reihe von RISC-V-Mikrocontrollern eingeführt. Diese MCUs sind bemerkenswert erschwinglich, man kann sagen, spottbillig, wobei einige ICs nur 10 Cent kosten, was ihnen den Spitznamen „10-Cent-MCU“ einbrachte. Einige Community-Mitglieder hatten sich bereits mit diesen neuen Mikrocontrollern befasst, und so wurde der Weihnachtswettbewerb zu einer Möglichkeit, Menschen mit einem gemeinsamen Ziel zu vereinen, ihr Verständnis für diese Chips zu vertiefen und Wissen auszutauschen. Ein wichtiger Aspekt des Wettbewerbs war die Hardware. Es scheint, dass sich die meisten Leute, die sich mit dem Entwurf von eingebetteten Systemen beschäftigen, auf die Software konzentrieren und die Hardware einigen wenigen Enthusiasten überlassen. Da es jedoch viele hochwertige und dennoch

kostenlose Open-Source-EDA-Softwarepakete wie KiCad [4] und EasyEDA [5] sowie erschwingliche Dienstleistungen für die Platinenherstellung und -bestückung gibt (Google is your friend), ist die Teilnahme an diesem Wettbewerb nicht auf Experten mit umfangreichen Fähigkeiten, Equipment und tiefen Taschen beschränkt.

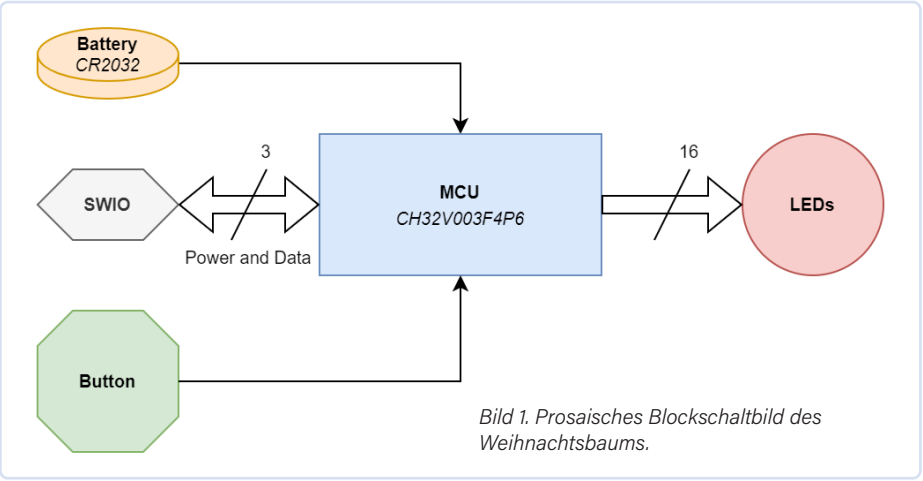


Bild 1. Prosaisches Blockschaltbild des Weihnachtsbaums.

Mein Projekt

Die Boards in meinem Projekt haben nur zwei Kupferlagen, so dass nur Grundkenntnisse im Platinenaufbau erforderlich sind. Um Bauteilkollisionen bei der Endmontage zu vermeiden, habe ich zunächst ein Papiermodell verwendet, um zu sehen, ob sich Bauteile nicht im Wege sind, bevor ich mich an die endgültigen Montage machte. Eine einfache Methode für dieses 3D-Projekt besteht darin, die Vorder- und Rückseite der Platine im Maßstab 1:1 drucken, sie auf ein dünnes Stück Pappe zu kleben, die Kanten abzuschneiden und schließlich die beiden Hälften zusammenzusetzen. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Footprints und die Positionierung der Bauteile korrekt sind.

Die Software wurde in C unter Verwendung der Hardware-Abstraktionsschicht (HAL) von WCH entwickelt, der im MounRiver-Studio [6] enthalten ist. Die Dokumentation dazu war spärlich, aber das Archiv *CH32V003EVT.ZIP* [7] auf der Website von WCH enthält Beispiele für die MCU-Peripherie, die zum Verständnis der HAL-Grundlagen und der MCU selbst ausreichen. Das MCU-Datenblatt [8] und das Referenzhandbuch [9] sind ebenfalls hilfreich. In der Software sind zwei Techniken wichtig: der Standby-Modus und der Betrieb der LEDs mit Software-PWM, da nur wenige Pins die Erzeugung von Hardware-PWM unterstützen. Beide Techniken tragen zu einer geringeren Leistungsaufnahme bei.

Blockdiagramm

Die Hardware ist in die folgenden Hauptbestandteile unterteilt (siehe **Bild 1**):

- **MCU**: Die Schlüsselkomponente ist der Mikrocontroller CH32V003F4P6 [10] mit einer Taktrate von (bis zu) 48 MHz, 16 KB Flash-Speicher, 2 KB RAM, 18 I/O-Leitungen, zwei 16-Bit-Timern, einem Watchdog-Timer, einem 8-Kanal-10-Bit-ADC, USART, I²C und SPI. Die Versorgungsspannung darf 2,7 V bis 5,5 V betragen. Der Chip ist in einem TSSOP20-Gehäuse erhältlich.
- **Batterie**: Die Platine verfügt über eine Halterung für eine CR2032-Batterie, die 3 V für die Stromversorgung bereitstellt.
- **Anschlüsse**: Eine dreipolige Stiftleiste ermöglicht den Anschluss einer externen Stromversorgung und bietet bidirektionale Kommunikation für Programmierung und Debugging.
- **Benutzeroberfläche**: Der Druck einer Taste ändert die Animationen oder schaltet das Gerät in den Standby-Modus.
- **Anzeige**: 16 LEDs sind mit der MCU verbunden, jede an einem eigenen Pin, was viele Animationen ermöglicht.

Hardware

Die Hardware ist sehr einfach: Jede LED ist über einen strombegrenzenden Widerstand an einem eigenen GPIO-Pin angeschlossen. Die Batteriespannung ist direkt mit der MCU verbunden, die die meiste Zeit im Standby-Modus läuft. Jumper verbinden die beiden Hälften der 3D-Anordnung. **Bild 2** zeigt den Schaltplan im Detail. Beachten Sie, dass die Taste den SWIO-Pin 18 (Single Wire Input Output) belegt, der aber über J1 zugänglich ist.

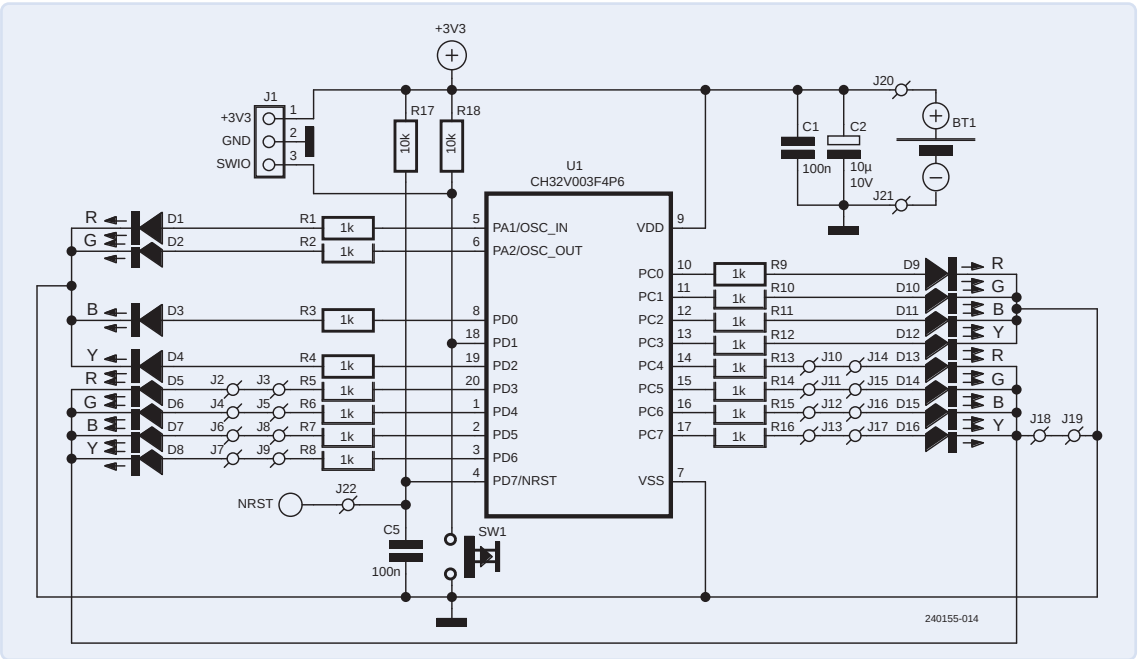


Bild 2. Der relativ einfache Schaltplan des Weihnachtsbaums.

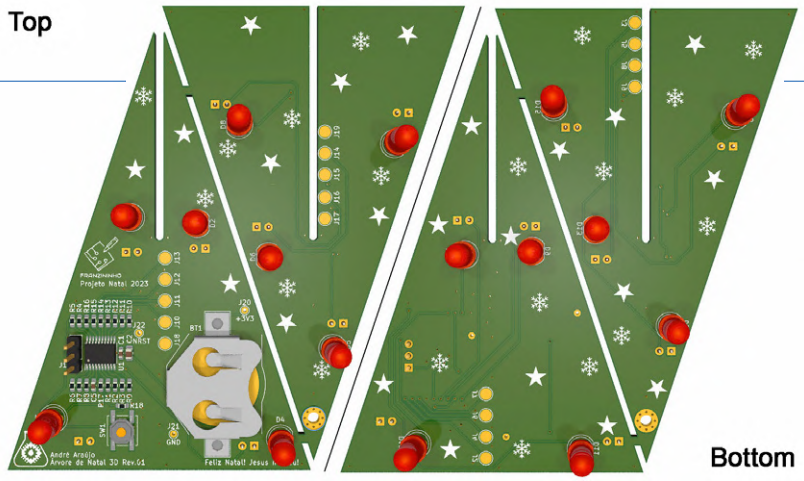


Bild 3. 3D-Rendering der Ober- und Unterseite der bestückten Platine.

Bild 4. WCH-Link, DAS Tool zur Programmierung und Fehlersuche. (Quelle: WCH [13])

Stückliste

Widerstände:
R1...R16 = 1 k, 1%, SMD 0603
R17, R18 = 10 k, 1%, SMD 0603

Kondensatoren:
C1, C5 =100 n / 50 V, SMD 0603
C2 = 10 µ / 25 V, SMD 0805

Halbleiter:
D1, D5, D9, D13 = LED, rot, 5 mm
D2, D6, D10, D14 = LED, grün oder orange, 5 mm
D3, D7, D11, D15 = LED, blau, 5 mm
D4, D8, D12, D16 = LED, gelb, 5 mm
U1 = CH32003F4P6, TSSOP20

Außerdem:
BT1 = 3V-Zelle CR2032 mit Halterung
SW1 = TPS526, C&K (Littelfuse)
Platine

Über den SWIO-Pin an J1 erfolgen die Softwareprogrammierung und das Debugging, was natürlich nur möglich ist, wenn die Taste nicht gedrückt ist. Das RC-Glied R17/C5 sorgt für einen Reset beim Einschalten. Der Reset-Pin NRST ist über J22 auf der Platine zugänglich.

Bild 3 zeigt ein 3D-Rendering der bestückten Ober- und Unterseite der in KiCad entworfenen Platine. Die beiden Hälften sind durch zwei kleine Brücken verbunden, die durchgeschnitten und abgeschliffen werden müssen, um sie zu trennen. Die beiden langen Nuten in jeder Hälfte ermöglichen das Zusammenfügen der beiden Teile der 3D-Form des Bäumchens. Die Lötbrücken befinden sich in der Nähe dieser Rillen und müssen gelötet werden, um die elektrischen Verbindungen zwischen den beiden Hälften herzustellen.

Software

Die Firmware wurde mit MounRiver Studio [6] entwickelt, einer angepassten Version der Eclipse-IDE, die mehrere Mikrocontroller von WCH unterstützt und das HAL zur Beschleunigung der Softwareentwicklung enthält. Die Quelldateien können von [14] heruntergeladen werden.

Bild 4 zeigt den WCH-Link [11], ein spezielles Tool zum Programmieren und Debuggen der MCU. Eine Seite ist über USB mit einem PC verbunden, das andere Ende weist einen Header für den Anschluss an eine MCU auf. Der WHC-Link enthält auch einen USB/UART-Konverter, der für die Embedded-Entwicklung sehr praktisch ist. Ich habe diese Funktion in diesem Projekt aber nicht verwendet.

Das Programm für den Weihnachtsbaum bietet vier Animationsmodi:

- **Verschachtelt**: Zwei Farben werden gleichzeitig eingeschaltet, und wenn eine ausgeschaltet wird, wird sukzessive eine andere eingeschaltet (zum Beispiel gelb und rot, rot und orange, orange und blau, blau und gelb und so weiter).
- **Sequentiell**: Schaltet jede Farbe der Reihe nach ein, bis alle Farben leuchten, und schaltet sie dann wieder der Reihe nach aus, bis alle LEDs dunkel sind.
- **Blinkend**: Jede Farbe blinkt separat, eine nach der anderen.
- **Pulsierend**: Jede Farbe wird einzeln auf- und ausgeblendet. Der Fadingeffekt wird durch eine Software-PWM mit variierender Impulsbreite erreicht.

Jeder Animationsmodus wird einige Male wiederholt und wechselt dann in den nächsten über. Nach Beendigung der letzten Animation geht die MCU in den Standby-Modus über. Mit der Taste können Sie den Animationsmodus weiterschalten und das Gerät in den Standby-Modus versetzen. Im Standby-Modus wird durch Drücken der Taste ein Interrupt ausgelöst, der den Mikrocontroller aufweckt und die erste Animation startet.

Bauen und Testen

Nach der Fertigstellung des Platinenentwurfs bestellte ich bei einem PCB-Dienst zehn Platinen mit bereits bestückten SMDs. Nur der Mikrocontroller war nicht vorrätig, so dass ich selber zum Lötkolben greifen und die MCUs mit der nötigen Sorgfalt in Eigenregie einbauen musste. Dagegen war das Bestücken der bedrahteten Bauteile (LEDs und die

Das Franzininho-Project

Das Franzininho-Projekt [1] ist eine brasilianische Initiative, die sich auf eingebettete Systeme, IoT und Maker-Ausbildung durch Open-Source-Hardware und Software-Tools konzentriert. Seine Mission ist es, Wissen zu fördern, Fachwissen über aktuelle Technologien zu teilen und Menschen zu inspirieren, ihre eigenen Projekte zu entwickeln.

Derzeit hat das Projekt mehrere Entwicklungsplatinen entwickelt, darunter Designs auf Basis des ESP32-S2 (Franzininho WiFi und Franzininho WiFi LAB), STM32C0 (Franzininho C0). Alle Designs verfügen über eine ausführliche Dokumentation und Code-Beispiele, so dass sie sowohl für Anfänger als auch für erfahrene Entwickler geeignet sind. Der Code für diese Boards kann auf anfängerfreundlichen Plattformen wie Arduino, MicroPython und CircuitPython oder auf fortgeschrittenen Plattformen wie ESP-IDF, STM32CubeIDE, Zephyr und NuTTX entwickelt werden.

Bild 5. Drei fertige Weihnachtsbäume. Einer leuchtet bereits.

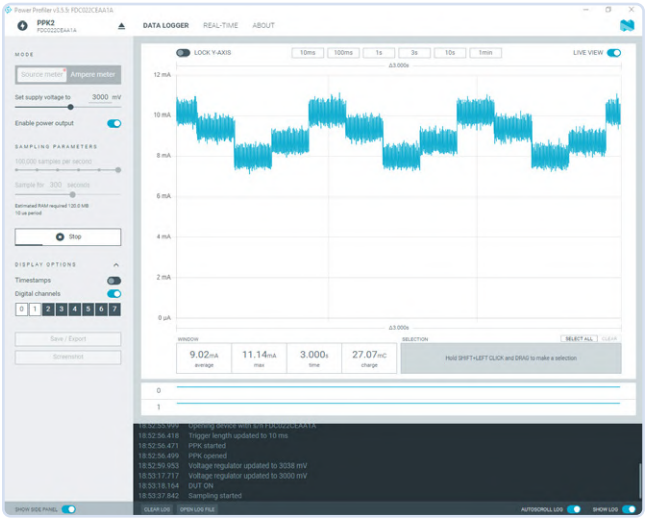


Bild 6. Screenshot der Leistungsmessung des Power Profiler Kit II von Nordic.

dreipolige Stiftleiste) geradezu eine Advents-Bastelaufgabe... Als alles fertig war, brauchte ich bloß noch die beiden Hälften miteinander verlöten. **Bild 5** zeigt drei voll funktionsfähige Weihnachtsbäume.

Mit dem Power Profiler Kit II von Nordic habe ich noch die Stromaufnahme des fertigen Geräts ermittelt. Dieses Testgerät kann das Gerät mit einer einstellbaren Spannung versorgen und auch den Strom messen, der dem Gerät entnommen wird. **Bild 5** zeigt den Testaufbau. Die Platinen wurden dabei mit 3 V aus dem Power Profiler versorgt. Kleiner Fake: Während der Tests war, anders als im Foto , keine Batterie eingelegt.

Die LEDs sind der Hauptverursacher der Stromaufnahme. Der Screenshot in **Bild 6** zeigt, dass der Weihnachtsbaum durchschnittlich 9 mA zieht. Eine typische CR2032-Batterie reicht daher für etwa 24 Stunden. Wenn die MCU in den Standby-Modus wechselt, werden alle LEDs ausgeschaltet und die Stromaufnahme sinkt auf durchschnittlich 9 µA. Das ist so wenig, dass man sich einen An/Aus-Schalter sparen kann, da eine CR2032-Batterie theoretisch für etwa 25.000 Stunden oder 2,8 Jahre im Standby-Modus ausreicht!

Es könnte eine gute Idee sein, orangefarbene LEDs anstelle der grünen zu verwenden. Dies würde zu einem höheren Kontrast mit den grünen Platinen führen.

Neuer Chip, neues Projekt

Vier Animationsmodi sind nicht das Ende der Möglichkeiten. Dieses Projekt ermöglichte es der Franzininho-Community und nun auch Ihnen, ein gutes Verständnis für diesen neuen Mikrocontroller zu erlangen. Nach dieser ersten gemeinsamen Erfahrung mit der CH32V-Familie waren die Mitglieder gespannt darauf, ein neues Projekt mit diesem Chip zu versuchen. Dieses neue Projekt ist noch in Arbeit und soll gegen Ende des Jahres veröffentlicht werden!

SG — 240155-02

Über den Autor

André Araújo hat einen Master of Science in Mechatronik der Polytechnischen Schule der Universität von São Paulo und verfügt über fast 15 Jahre Erfahrung in der Entwicklung medizinischer Geräte. Derzeit arbeitet er als Engineering Manager bei J.G. Moriya und ist Mentor des Kurses „Making Embedded Systems“, der von Elecia White bei Classpert (*https://tinyurl.com/yc7us3ja*) abgehalten wird. André teilt auch persönliche Projekte auf Instagram (*www.instagram.com/mechatronixlab*).

Passende Produkte

- **ZD-8961-A Temperaturgesteuerte Lötstation**
  www.elektor.de/20536
- **Whadda WSPXL103 Poly-Rentier XL (Löt- und Programmierkit inkl. Arduino Nano Every)**
  www.elektor.de/20325

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Dann kontaktieren Sie bitte den Autor über LinkedIn (www.linkedin.com/in/andremdaraujo) oder wenden Sie sich an die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.

WEBLINKS

[1] Franzininho-Projek (portugiesisch): https://franzininho.com.br
[2] Franzininhos GitHub-Seite (portugiesisch): https://github.com/Franzininho/Projeto-Natal-2023
[3] USB/UART-Transceiver WCH340 : https://www.wch-ic.com/products/CH340.html
[4] KiCad: https://www.kicad.org
[5] EasyEDA: https://www.easyeda.com
[6] MounRiver Studio: http://www.mounriver.com
[7] CH32V003EVT-Archiv: https://tinyurl.com/49sfjzmr
[8] Datenblatt CH32V003: https://tinyurl.com/7yzy5jab
[9] Referenzhandbuch CH32V003: https://tinyurl.com/bde8tvmk
[10] MCU CH32V003F4P6: https://www.wch-ic.com/products/CH32V003.html
[11] WCH-Link: https://www.wch-ic.com/products/WCH-Link.html
[12] Nordic Power Profiler Kit: https://tinyurl.com/3urhseh5
[13] Projektdateien auf GitHub: https://tinyurl.com/54fdyuaa
[14] Projekt bei Elektor Labs: https://www.elektormagazine.de/labs/3d-christmas-tree-pcb

Aller Anfang...

...muss nicht schwer sein: Weiter geht es mit den Opamps!

Von Eric Bogers (Elektor)

In der letzten Folge haben wir einige Signalgeneratoren mit Operationsverstärkern vorgestellt: den Rechteck- und den Dreieckgenerator. In der letzten Folge des Basiskurs' des Jahres wollen wir unter anderem einen Blick auf den Sinusgenerator und einige Multivibratoren werfen.

Der Sinusgenerator

Obwohl die Sinusschwingung vielleicht die „natürlichste" aller Schwingungen ist, macht es der praktischen Elektronik tatsächlich ziemliche Schwierigkeiten, eine Sinuswelle zu erzeugen - vor allem, wenn dies mit einem Minimum an Verzerrungen erreicht werden soll.

Bild 1 zeigt einen so genannten Wien-Brücken-Oszillator (der nichts mit einer beschwingten Donauquerung in der österreichischen Kapitale zu tun hat), der eine Sinuswelle erzeugt, deren Frequenz gegeben ist durch:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

Mit dem Trimmpotentiometer wird die Gesamtverstärkung eingestellt. Diese Einstellung ist ziemlich kritisch: Wenn die Gesamtverstärkung kleiner als 1 ist, läuft der Oszillator nicht an. Und wenn die Verstärkung größer als 1 ist, wird der Schaltkreis in die Sättigung getrieben, was zu einer Übersteuerung der Welle und damit auch zu Verzerrungen führt.

Es gibt verschiedene Tricks, um diesen Oszillator stabil zu machen, die aber alle ihre eigenen Nachteile mit sich bringen. Bei der Begrenzung mit Hilfe von Dioden wird die Sinuswelle oft noch schlechter. Die Stabilisierung mit einem PTC-Widerstand (in Form einer kleinen Glühlampe) ist für die Amplitudenstabilität nicht förderlich. Deshalb lassen wir die Schaltung aus Bild 1 unverändert und lernen es, mit mit einer Verzerrung von etwa 1% zu leben. Wenn jedoch eine geringere Verzerrung erforderlich ist, können wir die Oberwellen am Ausgang mit einem Hoch- oder Bandpassfilter unterdrücken. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Sinuswelle digital zu erzeugen und sie dann mit einem D/A-Wandler in ein analoges Signal umzuwandeln. Die Frequenz- und Amplitudenstabilität sowie die geringe Verzerrung einer solchen Lösung sind mit keiner analogen Schaltung zu erreichen.

Kippstufen mit Opamp

Der **bistabile Multivibrator** (bistabile Kippstufe, Flip-Flop) wurde bereits in der Vergangenheit vorgestellt - damals aus diskreten (einzelnen) Transistoren aufgebaut. Diese Funktion kann aber auch mit einem Operationsverstärker erreicht werden, wie **Bild 2** zeigt. Die Widerstände R2 und R3 versorgen den Operationsverstärker mit einer positiven Rückkopplung (genau wie bei dem Rechteckgenerator in der vorherigen Folge). Das Teilerverhältnis der Ausgangsspannung spielt kaum eine Rolle - diese Schaltung dürfte mit fast jedem Verhältnis korrekt funktionieren.

Der Widerstand R1 zieht den invertierenden Eingang auf Masse. Wenn einer der beiden Taster gedrückt wird, wird der invertierende Eingang entweder mit der positiven oder der negativen Versorgungsspannung verbunden, der Ausgang des Operationsverstärkers kippt auf das entgegengesetzte Potential - und verharrt dort, auch nachdem der Taster losgelassen wurde.

Bild 3 zeigt einen bistabilen Multivibrator, der mit nur einem einzigen Drucktaster gesteuert wird. Nehmen wir an, dass der Ausgang positiv ist. Der Kondensator wird dann über R4 auf das

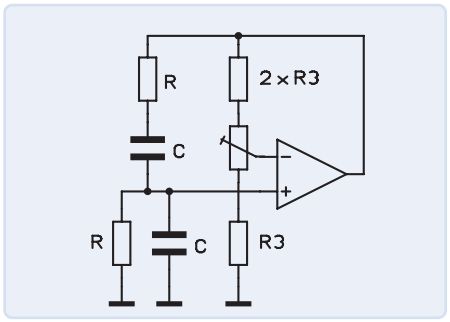


Bild 1. Wien-Brücken-Sinusgenerator.

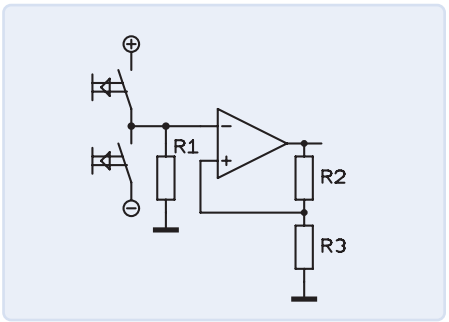


Bild 2. Bistabiler Multivibrator.

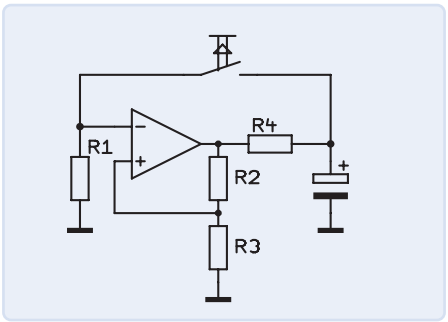


Bild 3. Flipflop mit nur einer Taste.

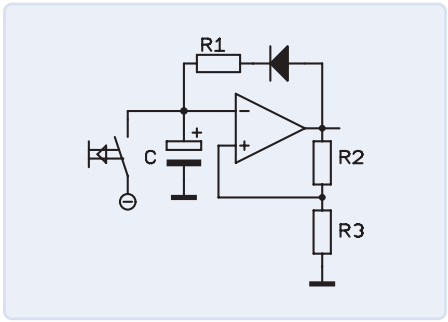


Bild 4. Monostabiler Multivibrator.

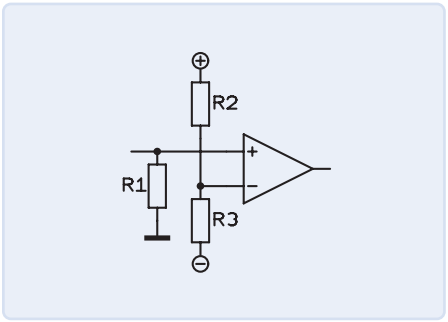


Bild 5. Ein gewöhnlicher Komparator.

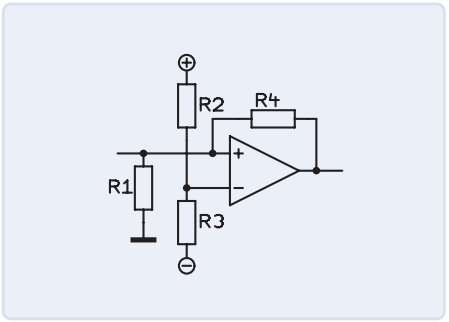


Bild 6. Der Schmitt-Trigger-Komparator.

gleiche Potential aufgeladen. Wenn wir den Taster drücken, wird dieses Potential mit dem invertierenden Eingang des Operationsverstärkers verbunden, der dann positiver wird als der nichtinvertierende Eingang. Dies hat zur Folge, dass sich der Ausgang des Operationsverstärkers umkehrt und negativ wird, woraufhin der Kondensator auf das negative Potential aufgeladen wird.
Mit den Spannungsteilern R2/R3 und R4/R1 lässt sich das Verhalten der Schaltung bei dauerndem Gedrückthalten des Tasters einstellen. Wenn die Spannung an R1 niedriger ist als die Spannung an R3, kann man den Taster so lange drücken, wie man will, aber der Zustand des Ausgangs ändert sich nicht. Wenn die Spannung an R1 jedoch größer ist, verhält sich die Schaltung wie ein astabiler Multivibrator, und der Ausgang schwingt so lange, wie der Knopf gedrückt gehalten wird.
Es ist auch möglich, einen **monostabilen Multivibrator** (Monoflop, One-shot) mit einem Operationsverstärker zu bauen. Die Schaltung in **Bild 4** ist vom **astabilen Multivibrator** (Rechteckgenerator) abgeleitet. Die Diode sorgt dafür, dass der Kondensator nur über den Ausgang geladen und nicht entladen werden kann. Letzteres wird durch den Drucktaster erreicht.

Komparator

Ein Komparator ist eine Schaltung, die zwei Spannungen miteinander vergleicht und dessen Ausgang in den meisten Fällen aktiv wird, wenn eine Spannung über oder unter einem festgelegten Schwellenwert liegt. Die Referenzspannung (der Schwellenwert) wird in **Bild 5** mit R2 und R3 eingestellt. Wenn die Spannung am nicht-invertierenden Eingang höher ist als die Referenzspannung, ist der Ausgang des Operationsverstärkers positiv - und im anderen Fall negativ.
Für „normale“ Anwendungen ist ein gewöhnlicher Komparator sicherlich ausreichend. Es gibt jedoch Anwendungen, bei denen die Eingangsspannung sehr nahe an der Referenzspannung liegt und zudem mit Rauschen überlagert ist. Dann könnte es passieren, dass der einfache Opamp-Komparator zwischen positiv und negativ oszilliert (er „klappert“), was im Allgemeinen unerwünscht ist und durch den Einsatz eines so genannten Schmitt-Triggers verhindert werden kann.

Schmitt-Trigger-Komparator

Der Schmitt-Trigger (**Bild 6**) ähnelt stark einem einfachen Komparator, hat aber einen zusätzlichen positiven Rückkopplungswiderstand. Diese Schaltung sollte nicht von einer niederohmigen Quelle gespeist werden; ist dies der Fall, muss ein Widerstand in Reihe mit dem Eingang hinzugefügt werden.
Der positive Rückkopplungswiderstand sorgt für ein gewisses Maß an Hysterese: Die Spannung, bei der der Ausgang positiv wird, ist höher als die Spannung, bei der der Ausgang wieder negativ wird. Die Hysterese sollte so bemessen sein, dass sie deutlich größer ist als das zu erwartende Rauschen des Eingangssignals.

Filterschaltungen

Der gesamte Audiobereich erstreckt sich über drei Dekaden, über den Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz. Ein „normaler“ Lautsprecher ist mit etwas Mühe in der Lage, eine Dekade einigermaßen gut wiederzugeben. Daher muss der gesamte Audiobereich in einzelne Teile aufgeteilt werden (zumindest, wenn man eine akzeptable Qualität wünscht), die dann von verschiedenen spezialisierten Lautsprechern wiedergegeben werden.
Es ist durchaus möglich, die erforderlichen Frequenzweichen mit passiven Filterschaltungen zu bauen, wie wir bereits in der Vergangenheit dieses Elektronik-Basiskurses gesehen haben. Diese passiven Filter haben jedoch einige Nachteile: Bei höheren Ordnungen werden die Verluste in den Bauteilen (vor allem durch den Widerstand des Kupferdrahtes, aus dem die Induktivitäten bestehen) zunehmend problematisch. Die Dämpfung der Lautsprecher nimmt deutlich ab, und „dicke“ Spulen und Kondensatoren sind schwer und teuer.
Deshalb ist es vorteilhaft, diesen Frequenzbereich *vor* dem Leistungsverstärker in die verschiedenen Bereiche aufzuteilen; man spricht dann von einer aktiven Frequenzweiche. Bei solchen aktiven Filtern können die Bauteilverluste mit Hilfe einer einfachen Verstärkerstufe leicht kompensiert werden. In der Regel werden keine Induktivitäten verwendet und diese Schaltungen nur mit RC-Gliedern - also mit geeigneten Kombinationen von Widerständen und Kondensatoren - aufgebaut.
Neugierig geworden? Sie müssen leider auf die Ausgabe Januar/Februar 2025 warten, in der wir in die spannende Welt der aktiven Frequenzweichen eintauchen… ⏮

RG – 240431-02

Anmerkung der Redaktion: *Diese Artikelserie „Aller Anfang…“ beruht auf dem Buch* „Basiskurs Elektronik“ *von Michael Ebner, das bei Elektor erschienen ist.*

› E-Buch, PDF, deutsch:
www.elektor.de/products/basiskurs-elektronik-pdf

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Haben Sie Fragen oder Anregungen zu diesem Artikel? Wenden Sie sich bitte an die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.

Source: Adobe Stock

Ein autonomer Sensorknoten Projekt-Update #1:

Reduzierung der Leerlauf-Stromaufnahme mit externer RTC mit Leistungsschalter

Von Saad Imtiaz (Elektor)

Im vorigen Artikel haben wir einen autonomen Sensorknoten zur Ermittlung von Umweltdaten entwickelt. Das grundsätzliche Setup funktionierte, aber die Stromaufnahme, insbesondere im Leerlauf, wurde als verbesserungswürdig ausgemacht. In diesem Update besprechen wir, wie eine Echtzeituhr MAX31334 mit eingebautem Leistungsschalter zur Optimierung der Stromaufnahme und zur Verlängerung der Batterielebensdauer beiträgt.

Bei den Anfängen der Projektentwicklung lag der Schwerpunkt auf einem funktionsfähigen, solarbetriebenen Sensorknoten [1], der Sensordaten über LoRaWAN übertragen kann und so die Fernüberwachung von Umweltanwendungen ermöglicht. Obwohl sich das eigentliche System als erfolgreich erwies, bestand eine der größten Herausforderungen in der Optimierung der Stromaufnahme, insbesondere in Zeiten des Leerlaufs.

Die Stromaufnahme des Systems im Tiefschlafmodus liegt immer noch bei 4,32 mA, was zwar weniger ist als im aktiven Zustand, aber eine weitere Senkung der Leerlauf-Stromaufnahme würde es dem System ermöglichen, mit einer einzigen Batterieladung und ohne Solaraufladung viel länger durchzuhalten. Dies ist besonders wichtig für abgelegene Einsatzorte, an denen nicht den ganzen Monat die Sonne scheint. Um dieses Ziels zu erreichen, ist eine externe RTC mit einem Schaltkreis, der die Stromversorgung des Systems vollständig unterbricht, wenn es nicht benutzt wird, eine sinnvolle Maßnahme. So wird das System nur dann mit Strom versorgt, wenn es an der Zeit ist, Messungen durchzuführen oder Daten zu übertragen.

Nach einer ausgiebigen Recherche habe ich mich für die Ultra-Low-Power-Echtzeituhr MAX31334 von Analog Devices [2] entschieden, aufgrund ihrer einzigartigen Fähigkeiten, die Zeit mit minimalem eigenem Strombedarf zu verwalten, und ihres integrierten Leistungsschalters, der die gesamte Energieversorgung des Systems automatisch steuert.

In diesem Projekt-Update werden wir uns also auf die Verbesserungen der Energieeffizienz und die Entwicklung eines neuen Moduls konzentrieren, das die RTC MAX31334 mit ihrem Leistungsschalter (und einige Anschlüsse) umfasst.

Warum die RTC MAX31334?

Der MAX31334 wurde aufgrund seiner außergewöhnlichen Leistungseffizienz und Vielseitigkeit auserwählt, die die RTC ideal für batteriebetriebene Systeme mit geringer Stromaufnahme macht, und zwar aus folgenden Gründen:

Ultra-niedrige Stromaufnahme

Mit einer Stromaufnahme von nur 70 nA im Zeitnehmer-Modus ist der MAX31334 eine der stromsparendsten RTCs auf dem Markt. Der Chip reduziert den Batteriestrom während der Leerlaufzeiten erheblich und ist deshalb perfekt für langlaufende IoT-Anwendungen, bei denen Energieeinsparungen entscheidend sind.

Integrierter Power-Schalter

Der MAX31334 verfügt über einen internen 500-mA-Leistungsschalter für die Stromversorgung des ESP32-C3 und der Sensoren. Er ermöglicht es dem System, den Strom während der Leerlaufzeiten komplett abzuschalten, was die Energieaufnahme auf nahezu Null reduziert und die Batterielaufzeit erheblich verlängert.

Interner Erhaltungslader

Der eingebaute Erhaltungslader kann einen Superkondensator direkt aufladen. Mehr über diese Funktion erfahren Sie im nebenstehenden

Kasten. Diese Funktion vereinfacht den Entwurf, da zu diesem Zweck keine externen Bauteile mehr benötigt werden. Die Einstellungen des Laders können über ein Register angepasst werden, um ein sicheres, effizientes Aufladen des Supercaps zu gewährleisten und eine zuverlässige Stromquelle als Reserve bereitzustellen.

Programmierbare Alarme und Weckfunktion

Programmierbare Alarme und Timer ermöglichen es dem MAX31334, das System in bestimmten Intervallen aufzuwecken. Die beiden Interrupt-Pins INT1 und INT2 bieten Reaktionsfähigkeit für externe Ereignisse und machen das Modul sehr anpassungsfähig für verschiedene Anwendungen.

Breiter Spannungsbereich und kosteneffektiv

Der MAX31334 kann mit Spannungen zwischen 1,1 V und 5,5 V betrieben werden, so dass eine Reihe von Stromquellen denkbar ist. Die Kombination von Zeitmessung, Steuerung der Stromversorgung und Ladefunktion in einem IC reduziert die Anzahl der externen Bauteile und die Gesamtkosten für den Entwurf. Durch diese Kombination von Funktionen erfüllt der MAX31334 die Anforderungen an Energieeffizienz und vereinfacht das Design, während er gleichzeitig eine robuste Kontrolle über die Energieverwaltung ermöglicht.

Der Schaltplan

Das Herzstück des Designs (**Bild 1**) ist also der MAX31334 (IC1), der sowohl die Zeitmessung als auch das Powermanagement übernimmt. Der Superkondensator (C2) ist direkt mit der RTC verbunden und wird durch den internen Erhaltungslader des MAX31334 aufgeladen, so dass die RTC auch dann noch funktioniert, wenn die Hauptbatterie abgeklemmt ist. Dieser Backup-Kondensator stellt sicher, dass „die Zeit" nicht verloren geht und das System nahtlos wieder in Betrieb gehen kann, sobald die Stromversorgung wiederhergestellt ist.

Der Anschluss K5 wird als Eingang für die Hauptbatterie verwendet und versorgt das gesamte System, einschließlich der RTC und der an den Leistungsschalter angeschlossenen Geräte. Der Verbinder K1 ermöglicht die I²C-Kommunikation zwischen der RTC und dem Mikrocontroller des Systems. Über diese Schnittstelle kann die MCU Zeitmessdaten abrufen und den internen Leistungsschalter (PSW)

Warum ist eine Backup-Stromversorgung für eine RTC erforderlich?

Ein Superkondensator dient als Backup-Stromquelle für die RTC MAX31334, um eine kontinuierliche Zeitmessung bei Stromunterbrechungen oder bei entladener Hauptbatterie zu gewährleisten. Dies ist entscheidend für die die Aktivierung geplanter Ereignisse und die genaue Zeitabfolge in Langzeiteinsätzen wie Sensornetzwerken oder entfernten IoT-Geräten.

Der Superkondensator versorgt die RTC vorübergehend mit Strom und verhindert so Datenverluste, wenn sich das System im Tiefschlaf befindet oder ein Stromausfall auftritt. Der interne Erhaltungslader des MAX31334 lädt den Superkondensator effizient auf, so dass dazu keine zusätzlichen externen Bauteile erforderlich sind. Da die RTC während dieser Zeiträume betriebsbereit bleibt, kann das System seine normalen Funktionen nahtlos wieder aufnehmen, sobald die Stromversorgung wiederhergestellt ist.

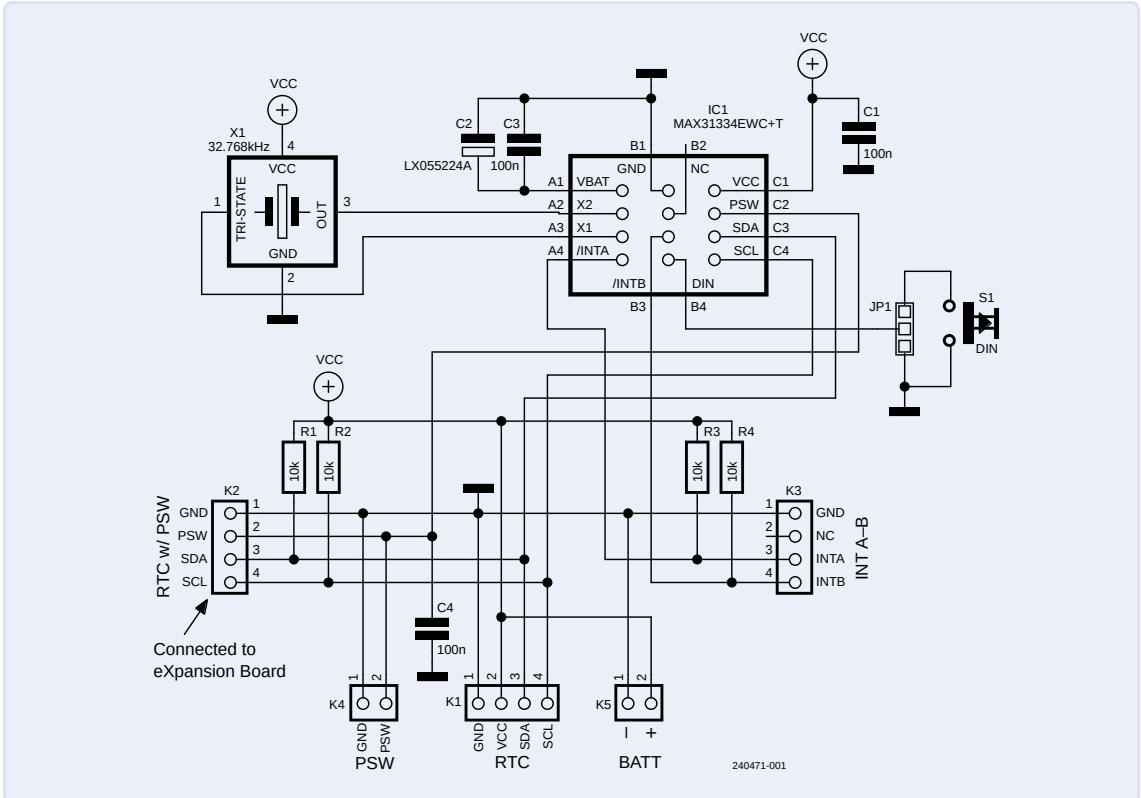


Bild 1. Schaltung des Moduls.

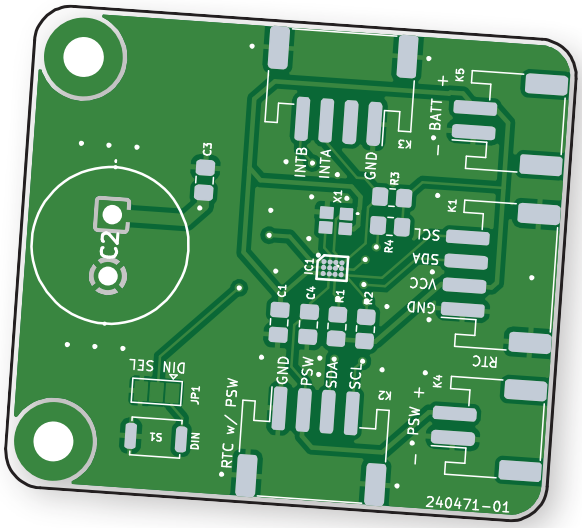


Bild 2. Platinenlayout des Moduls.

Die Befestigungslöcher erlauben eine sichere Installation im Gehäuse und machen das Modul robust und anpassungsfähig für verschiedene Projekte. Die Grove-Anschlüsse gewährleisten eine schnelle und einfache Zusammenarbeit auch mit anderen Entwicklungsplatinen und erhöhen so die Flexibilität des Moduls.

Nächste Schritte: Prüfung und Validierung

Obwohl das Modul schon entworfen wurde und der Schaltplan und die Platine fertig sind, besteht der nächste Schritt in der Erprobung des Systems unter realen Bedingungen. Sobald die Hardware zusammengebaut ist, werden detaillierte Tests der Stromaufnahme mit dem Joulescope JS200 hoffentlich bestätigen, dass das Modul das Entwicklungsziel erfüllt, die Stromaufnahme im Leerlauf auf nahezu Null zu reduzieren. Außerdem wird die Zuverlässigkeit des Systems über längere Zeiträume getestet, um sicherzustellen, dass die Backup-Batterie und der Leistungsschalter wie erwartet funktionieren.

RG – 240471-02

der RTC steuern, der die Stromversorgung des gesamten Systems kontrolliert. Da K1 und K5 direkt verbunden sind, wird auch eine an K1 angeschlossene Mikrocontrollerplatine ständig mit Strom versorgt. Wenn eine (Mikrocontroller-) Platine nur zeitweise mit Strom versorgt werden muss, um Energie zu sparen, müssen Sie sie an K2 oder K4 anschließen. Über diese Anschlüsse wird die Stromversorgung einer Tochterplatine oder eines externen Moduls gesteuert, so dass der MAX31334 bestimmte Geräte je nach Bedarf des Systems ein- und ausschalten kann. Über K2 hat man auch Zugriff auf den I²C-Bus.

Der Verbinder K3 legt die beiden Interrupt-Pins INT1 und INT2 frei, die von R4 und R5 auf High gezogen werden. Mit diesen Interrupts kann man das System in vorgegebenen Intervallen oder als Reaktion auf externe Triggerereignisse aufwecken, was dem System eine größere Flexibilität bei der Art und Weise und dem Zeitpunkt des Einschaltens verleiht.

Zusätzlich bieten Jumper JP1 und Taster S1 am DIN-Pin (mit Schmitt-Trigger) eine manuelle Kontrolle über den Stromversorgungszustand des Systems. Benötigt man diese Funktion nicht, darf der DIN-Pin an JP1 auf Masse gelegt (sprich: deaktiviert) werden.

Der Schaltplan ist auf ein effizientes Powermanagement ausgelegt und nutzt die Fähigkeiten des MAX31334, um die Stromversorgung des Systems zu steuern und den Superkondensator zu laden, ohne dass zusätzliche externe Bauteile erforderlich wären. Durch seine Einfachheit ist dieser Entwurf sehr anpassungsfähig für verschiedene IoT- und sensorbasierte Anwendungen.

Ein kurzer Blick auf die Platine

Die zweilagige Modulplatine ist nur 40 mm × 45 mm groß (**Bild 2**) und verfügt über Grove-Anschlüsse, um die Kompatibilität mit einer Vielzahl von Sensoren, Modulen und Mikrocontrollern zu verbessern. Der Anschluss K1 wird für die I²C-Kommunikation mit dem Hauptcontroller verwendet, während K2 und K4 die Stromversorgung für Tochterplatinen der externe Module übernehmen. Der Anschluss K5 versorgt das System mit Strom, und der Superkondensator (C2) für eine Notstromversorgung ist in der Mitte positioniert. In **Bild 3** ist eine 3D-Darstellung der Vorder- und Rückseite der Platine zu sehen.

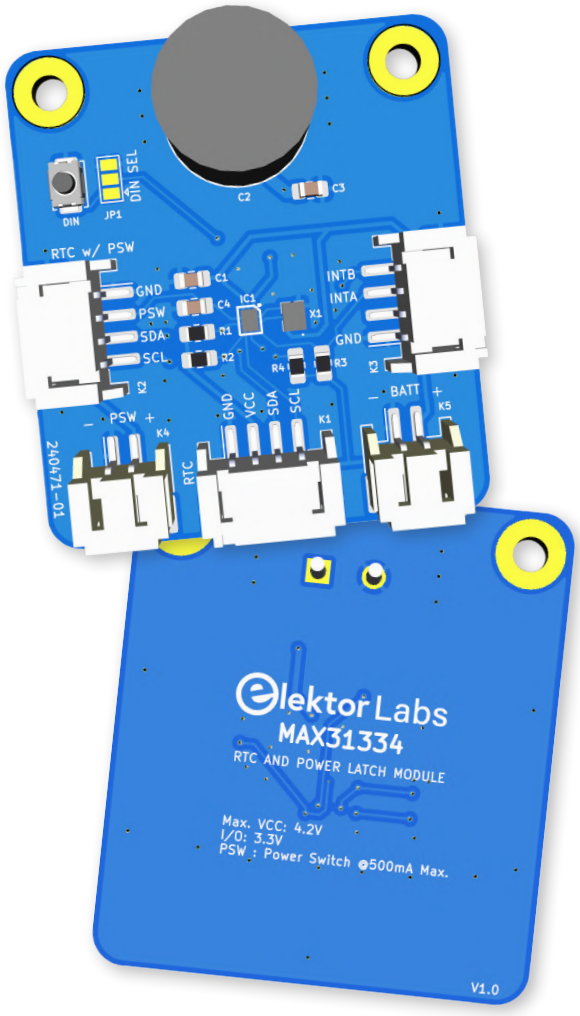


Bild 3. 3D-Rendering der bestückten Platine.

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Wenn Sie technische Fragen oder Anmerkungen zu diesem Artikel haben, wenden Sie sich bitte an den Autor unter saad.imtiaz@elektor.com oder an die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.

Über den Autor

Saad Imtiaz, Senior Engineer bei Elektor, ist Mechatronikingenieur mit umfangreicher Erfahrung in Embedded Systems und Produktentwicklung. In seiner Karriere hat er mit einer Vielzahl von Unternehmen zusammengearbeitet, von innovativen Startups bis hin zu etablierten globalen Unternehmen, und dabei zukunftsweisende Prototypen- und Entwicklungsprojekte vorangetrieben. Mit seinem reichen Hintergrund, der auch eine Zeit in der Luftfahrtindustrie und die Leitung eines Technologie-Startups umfasst, bringt Saad eine einzigartige Mischung aus technischem Fachwissen und unternehmerischem Geist in seine Aufgaben bei Elektor ein. Hier trägt er zur Projektentwicklung sowohl in der Software- als auch in der Hardware-Entwicklung bei.

Passende Produkte

- **Seeed Studio XIAO ESP32C3**
  www.elektor.de/20265
- **Seeed Studio Grove SCD30 CO2 (Temperatur- und Feuchtesensor)**
  www.elektor.de/20012
- **Seeed Studio LoRa-E5 STM32WLE5JC (Entwicklungskit)**
  www.elektor.de/19956
- **Seeed Studio Solar Panel (3 W)**
  www.elektor.de/19131
- **Waveshare Solarstrom-Managementmodul**
  www.elektor.de/20488
- **Dragino LoRa/LoRaWAN IoT Kit v3 (EU868)**
  www.elektor.de/20775

WEBLINKS

[1] Saad Imtiaz, „Ein autonomer Sensorknoten“, Elektor 9-10/2024: https://elektormagazine.de/240354-02

[2] MAX31334 Ultra-Low-Power-RTC mit integriertem Leistungsschalter: https://www.analog.com/en/products/max31334.html

TOSHIBA

Innovative Solutions For a Sustainable Future

electronica 2024
November 12 – 15
Fair Munich

C3.119

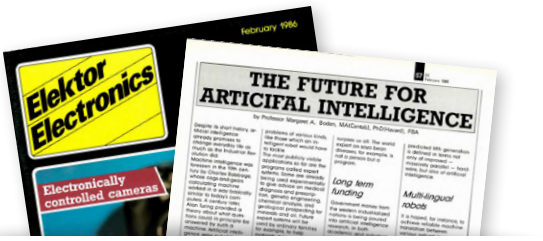
Quelle: @gguy/stock.adobe.com

2024 Eine Odyssee in die KI

Ein Blick zurück in die Zukunft

Von Brian Tristam Williams (Elektor)

In weniger als zwei Jahren hat die KI die Welt der Elektronik und des Programmierens im Sturm erobert. Von hoch entwickelten Tools für den Platinenentwurf bis hin zur KI-gesteuerten Firmware-Automatisierung hat die Branche rasante Veränderungen erlebt. Ingenieure und Maker haben jetzt Zugang zu intelligenteren, effizienteren Systemen, die die Entwicklungszeit verkürzen und die Leistung verbessern. Die Rolle der künstlichen Intelligenz in eingebetteten Systemen, bei der Echtzeitverarbeitung und sogar beim Chipdesign prägt die Zukunft der Elektronik auf eine Art und Weise, die noch vor einem Jahr kaum jemand hätte vorhersagen können.



Ein Artikel in der englischen Elektor-Ausgabe von Februar 1986 begann wie folgt:

„Trotz ihrer kurzen Geschichte verspricht die künstliche Intelligenz bereits jetzt, das tägliche Leben so stark zu verändern wie die industrielle Revolution. Die maschinelle Intelligenz wurde im 19. Jahrhundert von Charles Babbage vorausgesehen, dessen Zahnräder-Rechenmaschine im Grunde genommen ähnlich wie die heutigen Computer funktionierte. Ein Jahrhundert später stellte Alan Turing eine Theorie darüber auf, welche Fragen grundsätzlich von einer solchen Maschine beantwortet werden könnten. Künstliche Intelligenz entstand aus der Arbeit an digitalen Computern im Zweiten Weltkrieg und erhielt 1956 einen würdigen Namen. Seit den ersten Bemühungen Mitte der 1950er Jahre hat sie einige bemerkenswerte Erfolge erzielt. Heutige Computer sind in der Lage, einige der Aufgaben auszuführen, die normalerweise nur von unserem Verstand erledigt werden können - allerdings nur in sehr begrenztem Umfang. Zum Beispiel können einige Programme sinnvoll auf Anfragen oder Aussagen in natürlichen Sprachen wie Deutsch oder Englisch reagieren - was bedeutet, dass normale Menschen keine spezielle Programmiersprache lernen müssen, bevor sie mit ihnen interagieren können." [1]

36 Jahre später dann das Erdbeben, als OpenAI im November 2022 der staunenden Menschheit das generative Chatmodell GPT-3.5 vorstellte (**Bild 1**).
Es schockierte die Menschen und ließ die Alarmglocken schrillen, so dass einige führende Vertreter der Industrie und des öffentlichen Sektors gar ein sechsmonatiges Moratorium für die weitere Entwicklung von KI forderten. Dazu kam es nicht, und die negativen Auswirkungen wurden größtenteils überbewertet.
Dennoch waren Menschen, Bereiche und Branchen betroffen, im Guten wie im Schlechten. Sie hat sich auf Arbeitsplätze ausgewirkt, hat einigen geschadet und anderen die Möglichkeit gegeben, ihre Produktivität zu steigern und Ressourcen für kreativere Leistungen freizusetzen.
Bevor wir einen Blick die Auswirkungen der KI auf die Welt im Allgemeinen werfen, wollen wir dies in Bezug auf unsere Lieblingsindustrie untersuchen.

KI in Elektronik und Programmierung

Künstliche Intelligenz hat die Elektronik- und Softwareentwicklung revolutioniert. Es wird für Ingenieure und Entwickler leichter, hochentwickelte und effizientere Systeme zu schaffen. KI wird in verschiedenen Bereichen der Elektronik eingesetzt, vom Schaltungsdesign bis zur Firmware-Entwicklung und Automatisierung.

KI-gesteuerte Elektronikentwicklung

In der Elektronikentwicklung helfen KI-Tools wie SnapMagic [2] von Natasha Baker bei der Rationalisierung von Prozessen, indem sie Aufgaben wie das Platinenlayout und die Bauteile-Auswahl automatisieren. SnapMagic macht den Platinenentwurf schneller und effizienter, insbesondere für Maker und Kleinentwickler. Durch die Analyse früherer Designs und die Bereitstellung intelligenter Vorschläge wird der Zeitaufwand für manuelle Anpassungen reduziert, so dass sich die Ingenieure auf kompliziertere Entwicklungsaufgaben konzentrieren können.
Darüber hinaus hat sich die Fähigkeit der KI, potenzielle Entwurfsfehler frühzeitig im Entwicklungsprozess vorherzusagen, in Bereichen, in denen Präzision und Zuverlässigkeit entscheidend sind, als unschätzbar wertvoll erwiesen. KI-gesteuerte Tools können die Leistung von Schaltungen unter verschiedenen Bedingungen simulieren und helfen, kostspielige Fehler zu vermeiden, die durch manuelle Nachlässigkeit entstehen könnten [3].

Eingebettete Systeme und KI at the Edge

Eingebettete Systeme, insbesondere auf Plattformen wie dem Beagle-

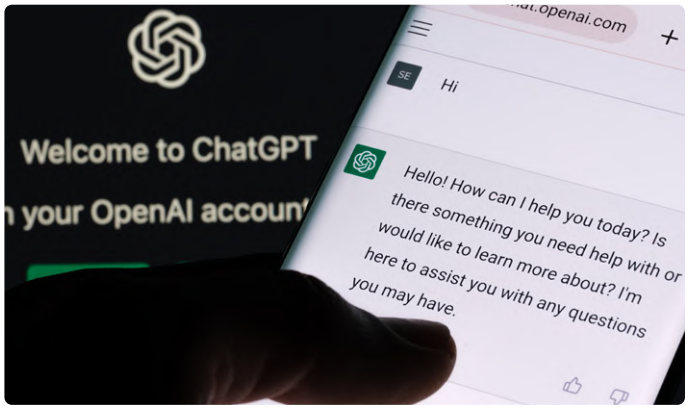


Bild 1. ChatGPT GPT-3.5 war das erste KI-Produkt, das die Phantasie der Menschheit anregte. Quelle: Ascannio / stock.adobe.com

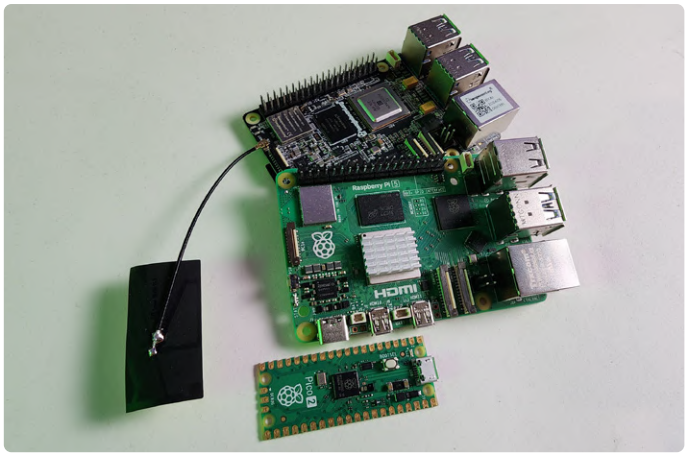


Bild 2. BeagleY-AI, Raspberry Pi 5 und Raspberry Pi Pico 2 profitieren alle von KI at the Edge.

Board, dem Raspberry Pi und sogar dem Raspberry Pi Pico (**Bild 2**), profitieren zunehmend von KI-gesteuerten Erweiterungen. KI at the Edge ermöglicht diesen Geräten die Verarbeitung von Daten in Echtzeit, wodurch Anwendungen wie maschinelles Sehen und Spracherkennung sowohl für Maker als auch für Profis leichter zugänglich werden [4].
KI-Modelle können direkt in die Hardware integriert werden, um die Sensorfusion, die vorausschauende Wartung und sogar das adaptive Energiemanagement zu übernehmen. Diese Edge-basierten KI-Lösungen sind für IoT-Geräte und Smart-Home-Systeme unverzichtbar, bei denen eine lokale Echtzeitverarbeitung aufgrund von Latenzzeiten und Datenschutzbedenken gegenüber Cloud-basierten Alternativen bevorzugt wird.

KI in der Firmware-Entwicklung und Automatisierung

KI hat auch einen tiefgreifenden Einfluss auf die Art und Weise, wie Entwickler Firmware schreiben und verwalten. Tools wie GitHub Copilot [5] und OpenAI Codex [6] werden eingesetzt, um sich wiederholende Programmieraufgaben zu automatisieren, bei der Fehlersuche zu helfen und sogar Boilerplate-Code auf der Grundlage von Aufforderungen in natürlicher Sprache zu erzeugen. Dadurch können sich die Entwickler auf komplexere Aspekte ihrer Projekte konzentrieren, was die Entwicklungszyklen verkürzt und die Produktivität erhöht [7].
Bei der Arbeit an Firmware für ein eingebettetes System können Entwickler beispielsweise mithilfe von KI optimierten Code für Gerätetreiber generieren, was die Leistung verbessert und die Wahrscheinlichkeit von Fehlern bei der Hardwareintegration verringert. KI-gestützte Programmiertools sind besonders hilfreich in ressourcenbeschränkten Umgebungen wie Mikrocontrollern, wo effizienter Code sowohl für die Leistung als auch für die Batterielebensdauer entscheidend ist.

KI-gestütztes Chipdesign

Der Einsatz von KI im Chipdesign ist ein weiterer entscheidender Faktor. Unternehmen wie Google und Apple nutzen KI, um die Platzierung und das Routing von Transistoren auf Siliziumwafern zu automatisieren und so die Leistung und Energieeffizienz zu optimieren. Googles KI-gestütztes Design für seine Tensor Processing Units (TPUs) ermöglichte es dem Unternehmen, effizientere Chips schneller als mit herkömmlichen Methoden zu entwickeln, also mit KI die KI zu beschleunigen!
Ebenso werden KI-gesteuerte kundenspezifische ASICs (Application-Specific Integrated Circuits) entwickelt, um KI-Aufgaben in der Unterhaltungselektronik zu beschleunigen, etwa in Smartphones und Smart-Home-Geräten. Diese Chips sind für Aufgaben wie Gesichtserkennung, Verarbeitung natürlicher Sprache und Bildverarbeitung optimiert und ermöglichen KI-Anwendungen in Echtzeit, ohne auf Cloud-Computing angewiesen zu sein.

Elektronik und Programmieren in der Zukunft

Die Integration von KI in Elektronik und Programmierung treibt die Entwicklung intelligenterer, effizienterer Systeme voran. Von Tools wie SnapMagic, die den Platinenentwurf vereinfachen, bis hin zu KI-gestützten Codierungsplattformen und Chipdesign - KI verändert die Art und Weise, wie Ingenieure und Maker an Elektronik herangehen. Mit der weiteren Entwicklung der KI wird sie zweifellos zu einem noch wichtigeren Bestandteil der Elektronikentwicklung werden und den Weg für Innovationen bei eingebetteten Systemen, IoT und darüber hinaus ebnen.

Generative KI verändert alle Wirtschaftsbereiche

Generative KI hat auch andere Wirtschaftsbereiche als die Tech-Welt umgestaltet. Der Anstieg der Finanzmittel für generative KI im Jahr 2023 wurde vor allem von Unternehmen verursacht, die nach Möglichkeiten zur Automatisierung der Inhaltserstellung, des Marketings, des Produktdesigns und des Kundendienstes suchten. KI-gesteuerte Tools für die Erstellung von Inhalten haben es Unternehmen beispielsweise ermöglicht, in großem Umfang personalisierte Marketingstrategien zu entwickeln und den Zeitaufwand für die Schaffung schriftlicher und visueller Inhalte drastisch zu reduzieren. Auch Branchen wie die Unterhaltungsindustrie haben sich die KI zu eigen gemacht und nutzen Modelle wie Lyria [8] von Google DeepMind zur Erzeugung von Musik und visuellen Effekten, womit eine neue Ära der KI-gesteuerten „Kreativität" eingeläutet wurde.

Im Kundenservice sind KI-Chatbots wie ChatGPT [9] von OpenAI und Gemini (ehemals Bard) [10] von Google immer ausgefeilter und in der Lage, ein breiteres Spektrum an Benutzeranfragen zu bearbeiten, personalisierte Anregungen zu bieten und sogar bei komplexen Aufgaben wie Programmierung und medizinischer Diagnose zu helfen. Mit der zunehmenden Verbreitung dieser Tools untersuchen Unternehmen zunehmend den Einsatz von KI bei der Berichtserstellung, der Abfassung von Rechtsdokumenten und sogar bei der Unterstützung der psychischen Gesundheit.

Auswirkungen der KI auf dem Arbeitsmarkt

Der Einsatz von KI in der Arbeitswelt hat zwar zu erheblichen Produktivitätssteigerungen geführt, aber auch Debatten über negative Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt ausgelöst. In einer Studie aus dem Jahr 2023 wurde hervorgehoben, wie KI die Qualifikationslücke zwischen hoch- und niedrigqualifizierten Arbeitnehmern verringern kann, indem sie Werkzeuge bereitstellt, mit denen Arbeitnehmer Aufgaben schneller und mit besserer Qualität erledigen können. Die Auswirkungen der KI auf die Arbeitswelt polarisieren jedoch, denn es wird befürchtet, dass die Automatisierung Arbeitsplätze in Bereichen wie dem Einzelhandel, dem Transportwesen und sogar professionellen Dienstleistungen in Medien, Rechtswesen und Medizin ersetzen könnte.

Auf der anderen Seite hat die KI neue Berufe in den Bereichen Datenwissenschaft, maschinelles Lernen und KI-Ethik geschaffen, da Unternehmen Spezialisten für die Verwaltung, Interpretation und Entwicklung von KI-Systemen einstellen. Die Unternehmen investieren in die Schulung und Weiterbildung ihrer Mitarbeiter für die Arbeit mit KI, wodurch einige Bedenken hinsichtlich des Verlusts von Arbeitsplätzen gemildert werden.

Die Rolle der KI bei Klimawandel und Nachhaltigkeit

KI spielt eine zunehmend wichtige Rolle bei der Bewältigung globaler Herausforderungen wie dem Klimawandel. Modelle wie DeepMind von Google wurden eingesetzt, um den Energiebedarf von Rechenzentren zu optimieren und so deren CO_2-Fußabdruck erheblich zu verringern. Andere KI-bezogene Initiativen haben sich auf prädiktive Analysen für Klimamodelle konzentriert, die es Wissenschaftlern ermöglichen, Wettermuster genauer vorherzusagen, Naturkatastrophen zu prognostizieren und die Nutzung erneuerbarer Energien zu optimieren.

Auch Start-ups haben begonnen, KI für Nachhaltigkeitslösungen zu nutzen. So wird KI beispielsweise zur Optimierung von Lieferketten eingesetzt, um Abfall zu reduzieren und das Ressourcenmanagement zu verbessern. Die Fähigkeit der KI, riesige Datenmengen zu verarbeiten, hat zu Durchbrüchen in Branchen wie der Landwirtschaft geführt, wo KI-gestützte Präzisions-Anbautechniken dazu beigetragen haben, den Wasserverbrauch und den Einsatz von Pestiziden zu reduzieren, was zu nachhaltigeren Anbaumethoden geführt hat.

KI im Bildungswesen: Ein zweischneidiges Schwert

Die Rolle der KI im Bildungswesen ist umgestaltend, aber umstritten. Tools wie ChatGPT werden von vielen Studierenden zur Unterstützung bei Hausaufgaben, Forschungsberichten und sogar beim Schreiben von Aufsätzen eingesetzt. Dies hat zu Bedenken hinsichtlich der akademischen Integrität geführt, so dass Pädagogen zunehmend auf KI-Erkennungstools wie DetectGPT [11] zurückgreifen, um festzustellen, ob die Studierenden KI-generierte Arbeiten einreichen. Diese Erkennungstools sind jedoch auch diskriminierend, insbesondere gegenüber nicht-englischen Muttersprachlern, da sie deren Arbeiten aufgrund von Unterschieden im Schreibstil oft fälschlicherweise als KI-generiert einstufen. Dies setzt jedoch auch voraus, dass die Lehrkräfte über das Wie und Warum dieser Tools sie Bescheid wissen müssen. Sie müssen den Schülern und Studierenden in dieser Technologie voraus sein, und das ist meiner Erfahrung nach nicht immer der Fall - ich habe Grundschüler gesehen, die KI-Texte mit faulem Copy-and-Paste bei Lehrern einreichten, die noch nie etwas von KI gehört hatten und die immer noch glauben, dass es ausreicht, ein paar Sätze zu googeln, um die Arbeiten auf Plagiieren zu überprüfen. Der evolutionäre Wettbewerb geht weiter, wie immer - jede narrensichere Methode trifft auf einen neuen Dummkopf.

Positiv zu vermerken ist, dass die KI genutzt wird, um personalisierte Lernerfahrungen zu schaffen. KI-Tutoren können jetzt die Schwächen der Schüler in Fächern wie Mathematik besser einschätzen und die Übungen entsprechend anpassen. Dieses Maß an Individualisierung hilft, Lernlücken zu schließen, und gibt den Schülern die Möglichkeit, in ihrem eigenen Tempo zu lernen. Lehrkräfte, die der Zeit voraus sind, setzen KI auch ein, um Aufgaben und Prüfungsergebnisse effizienter zu benoten, so dass sie sich auf das Engagement der Schüler und den Unterricht konzentrieren können.

Ethik und KI: Navigation im Minenfeld

Mit der zunehmenden Verbreitung von KI haben sich auch die ethischen Bedenken verschärft. Eine der wichtigsten Debatten dreht sich um die Transparenz von KI-Modellen. Mit dem Aufkommen von Basismodellen wie GPT-4 und Gemini haben Forscher darauf hingewiesen, dass es immer schwieriger wird, zu verstehen, wie diese Modelle zu ihren Schlussfolgerungen kommen. Diese Undurchsichtigkeit, die als „Black-Box-Problem" bekannt ist, hat zu Forderungen nach mehr Transparenz bei der Entwicklung von KI-Modellen geführt.

Ethische Fragen im Zusammenhang mit Voreingenommenheit in der KI sind nach wie vor ein großes Problem. KI-Modelle, die auf der Grundlage bestehender Daten trainiert werden, spiegeln häufig gesellschaftliche Vorurteile wider, was zu Diskriminierung in Bereichen wie Einstellung,

Strafverfolgung und Kreditvergabe führt. Die Einführung des *Foundation Model Transparency Index* im Jahr 2023, der KI-Modelle anhand von 100 Transparenzaspekten bewertet, war ein Schritt, um diese Bedenken auszuräumen. Dennoch können KI-Systeme, wie bei den KI-Erkennungstools gesehen, unbeabsichtigt Vorurteile verstärken, was zu Forderungen nach einer besseren Aufsicht führt.

Ein weiteres aufkommendes ethisches Problem ist das Potenzial der KI, bewusste Fälschungen und Fehlinformationen zu verbreiten, insbesondere im politischen Bereich. Angesichts der bevorstehenden Wahlen in mehreren Ländern hat der Einsatz von KI zur Erstellung überzeugender, aber dennoch falscher Narrative die Alarmglocken schrillen lassen, da die Demokratie untergraben werden könnte. Gesetzgebende Gremien auf der ganzen Welt, einschließlich der USA und der Europäischen Union, haben mit der Ausarbeitung von Vorschriften begonnen, um diese Herausforderungen anzugehen, aber die Fortschritte sind langsam und uneinheitlich.

KI und Gesundheitswesen: Herausforderungen und Chancen

Der Vorstoß der KI in das Gesundheitswesen ist sowohl vielversprechend als auch problematisch. Einerseits wurden KI-Modelle wie Gemini Pro eingesetzt, um Ärzte bei der Diagnose von Krankheiten zu unterstützen und Behandlungsempfehlungen zu geben. Eine Studie aus dem Jahr 2023 ergab, dass KI in 91...93 % der Fälle sichere klinische Antworten geben kann. Dieselbe Studie ergab jedoch, dass KI-Modelle häufig falsche Belegstellen liefern und gelegentlich aufgrund „halluzinierter" Daten schädliche Behandlungen empfehlen, was Bedenken hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit in kritischen Gesundheitsszenarien aufkommen lässt. [4]

Darüber hinaus hat die KI ihr Potenzial in der medizinischen Bildgebung gezeigt und ermöglicht schnellere und genauere Diagnosen von Krankheiten wie Hautkrebs. Es wurden auch KI-Modelle entwickelt, um den Ausbruch von Krankheiten vorherzusagen und die Patientenversorgung durch personalisierte Behandlungspläne zu verbessern. Die Integration von KI in das Gesundheitswesen verläuft jedoch aufgrund gesetzlicher Hürden, datenschutzrechtlicher Bedenken und der Notwendigkeit menschlicher Kontrolle bei wichtigen Entscheidungen nur langsam.

Aus Gründen des Verbraucherschutzes empfehlen Tools wie ChatGPT aus reiner Vorsicht immer, einen Arzt aufzusuchen, sobald man irgendetwas berührt, das auch nur im Entferntesten mit einer Anomalie am menschlichen Körper zu tun hat, von einem trockenen weichen Gaumen bis zu einem juckenden Ellbogen. Ich war diese Wiederholungen leid und habe die GPT mit einigen benutzerdefinierten Anweisungen optimiert.

Navigieren an der nächsten Grenze der KI

KI hat im vergangenen Jahr enorme Fortschritte gemacht, mit Fortschritten bei generativen Modellen, in der wissenschaftlichen Forschung und im Gesundheitswesen sowie mit steigenden Investitionen und einer breiteren Akzeptanz in allen Branchen. Die rasante Entwicklung der KI bringt jedoch auch erhebliche Herausforderungen in Bezug auf Ethik, Regulierung und öffentliche Wahrnehmung mit sich. In dem Maße, in dem KI in den Alltag Einzug hält, wird es von entscheidender Bedeutung sein, Innovation und Verantwortung in Einklang zu bringen, damit KI der Gesellschaft als Ganzes zugutekommt. Angesichts der laufenden Entwicklungen in der Gesetzgebung, den ethischen Rahmenbedingungen und der Technologie bleibt die Zukunft der KI sowohl spannend als auch ungewiss.

RG — 230181-J-02

Über den Autor

Brian Tristam Williams ist von Computern und Elektronik fasziniert, seit er im Alter von 10 Jahren seinen ersten „Mikrocomputer" bekam. Seine Reise mit Elektor begann, als er mit 16 Jahren sein erstes Heft kaufte. Seitdem verfolgt er die Welt der Elektronik und Computer, erforscht und lernt ständig dazu. Seit 2010 arbeitet er bei Elektor. Heute interessiert er sich für die neusten Techniktrends, insbesondere für künstliche Intelligenz und Einplatinencomputer wie den Raspberry Pi.

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Wir würden gerne von Ihnen erfahren, wie Sie KI einsetzen und wie sie sich in den letzten zwei Jahren auf Sie ausgewirkt hat. Wenn Sie Fragen oder Anmerkungen haben, schicken Sie mir eine E-Mail an brian.williams@elektor.com. Sie können mich auch jeden Monat auf Elektor Engineering Insights auf YouTube sehen, und Sie können mich unter @briantw auf X finden.

WEBLINKS

[1] Prof. M. Boden, „Artificial Intelligence", Elektor (engl. Ausgabe), Februar 1986: https://elektormagazine.com/magazine/elektor-198602/46891
[2] Elektor TV, „Innovation with AI: Interview with Natasha Baker of SnapMagic": https://youtu.be.com/iWnPgEctO8Q
[3] Google Research, "2023: A year of groundbreaking advances in AI and computing": https://tinyurl.com/googleresearch2023
[4] Stanford University Human-Centered Artificial Intelligence, „13 Biggest AI Stories of 2023": https://tinyurl.com/stanford13aistories
[5] GitHub Copilot: https://github.com/features/copilot
[6] OpenAI Codex: https://openai.com/index/openai-codex
[7] Forbes Australia, „The 2024 AI Index is out. Here are the Top 10 takeaways": https://tinyurl.com/forbesai2024index
[8] Lyria-Modell von Google DeepMind: https://deepmind.google/discover/blog/transforming-the-future-of-music-creation
[9] ChatGPT von OpenAI: https://chat.openai.com
[10] Gemini von Google: https://gemini.google.com
[11] DetectGPT: https://detectgpt.com

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).

PTS200 Smart-Lötkolben (inkl. 4 Lötspitzen + 100 W Netzteil)

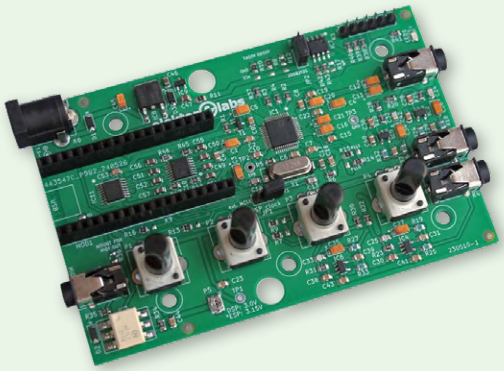
Der PTS200 ist ein leistungsstarker, ESP32-gesteuerter tragbarer Smart-Lötkolben mit einer regulierbaren Ausgangsleistung von 18 bis 100 W. In Verbindung mit einem 100-Watt-Netzteil und einer 4-Ohm-Lötspitze macht dieser Lötkolben eine herkömmliche Lötstation überflüssig und erfüllt die Anforderungen verschiedener Lötaufgaben. Es verfügt über 4 einstellbare Betriebsspannungen und kann so für verschiedene Stromquellen konfiguriert werden.

Preis: ~~124,95 €~~

Sonderpreis: 99,95 €

www.elektor.de/20940

Elektor Audio DSP FX Processor



Der Elektor Audio DSP FX Processor kombiniert einen Espressif ESP32-Mikrocontroller und einen ADAU1701 Audio DSP von Analog Devices. Neben einem vom Benutzer programmierbaren DSP-Kern verfügt der ADAU1701 über hochwertige integrierte Analog-Digital- und Digital-Analog-Wandler und verfügt über einen I²S-Port. Dadurch eignet es sich als hochwertiges Audio-Interface für den ESP32.

Preis: ~~99,95 €~~

Sonderpreis: 79,95 €

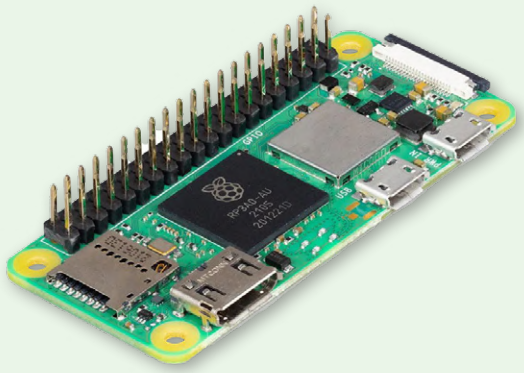
www.elektor.de/20895

Raspberry Pi AI Camera

Preis: 79,95 €

www.elektor.de/20953

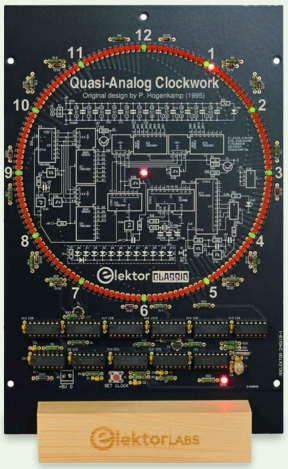
Raspberry Pi Zero 2 WH (mit Header)



Preis: 22,95 €

www.elektor.de/20952

Elektor Quasi-analoges Uhrwerk-Kit

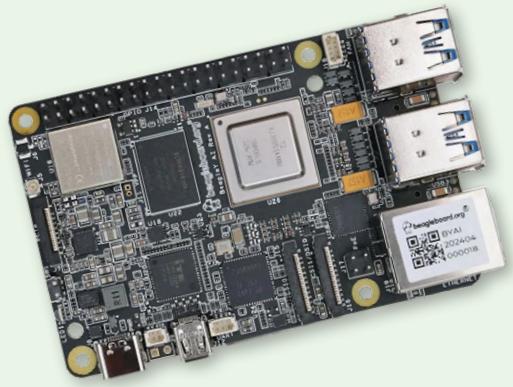


Preis: ~~79,95 €~~

Sonderpreis: 64,95 €

www.elektor.de/20944

BeagleY-AI SBC mit GPU, DSP und KI-Beschleunigern



Preis: 89,95 €

www.elektor.de/20991

LED-Displays mit demMAX7219

Ein praktischer Ansatz für einen großartigen Chip

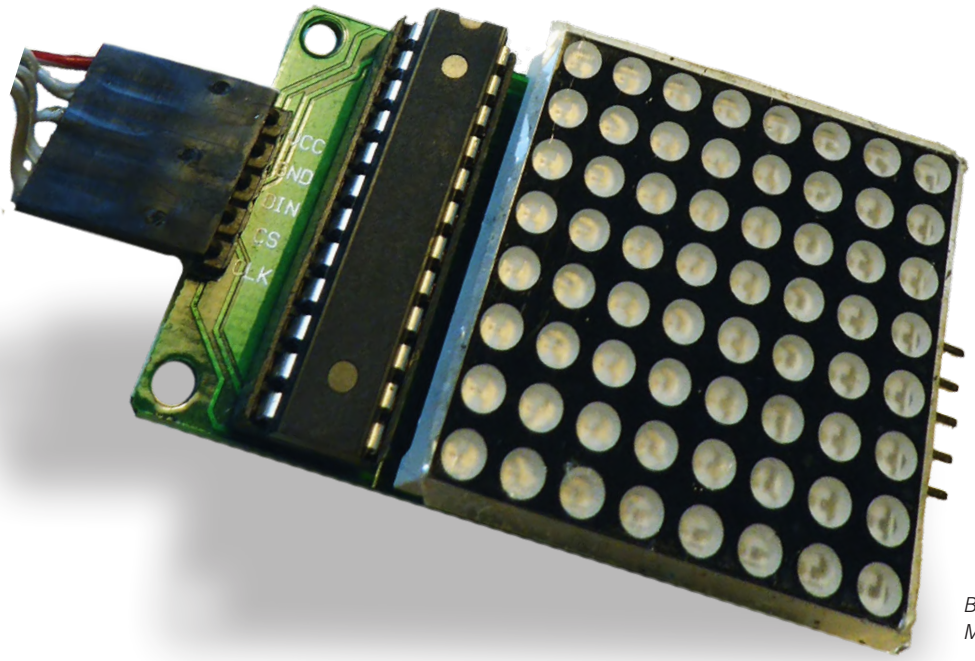


Bild 1. Ein günstiges MAX7219-Modul.

Von Dr. Jonathan Hare (Großbritannien)

Der MAX7219 ist ein sehr nützlicher und vielseitiger Display-Treiber, der bis zu 64 LEDs unabhängig ansteuern kann. Der Display-Treiber ist zwar bekannt, aber bestehende Tutorials verwenden oft vorgefertigte Bibliotheken zu seiner Anwendung. Ich schlage dagegen einen „bodenständigen" Ansatz vor, indem ich die Register des ICs direkt ansteuere, um ein besseres Verständnis zu erreichen. Hier erhalten Sie die praktischen Informationen, die Ihnen dabei helfen werden, Ihre Projekte mit diesem nützlichen, erschwinglichen und unterhaltsamen Chip zu realisieren.

Der MAX7219 [1] von Maxim Integrated in seinem 24-poligen Gehäuse kann bis zu acht Reihen von acht LEDs oder alternativ bis zu acht Siebensegmentanzeigen unabhängig voneinander ansteuern. Das ist ideal für Projekte, bei denen man eine Reihe von LEDs für eine visuelle Anzeige benötigt. Kürzlich habe ich acht dieser Chips verwendet, um einen Würfel mit 512 LEDs in einem interaktiven Spiel anzusteuern, mit dem Matrix- und Tensoralgebra gelehrt wird [2]. Es gibt viele interessante Projekte im Internet mit dem MAX7219, die schon toll sind, wenn man einfach nur kopieren will. Dennoch ist das aber nicht sehr hilfreich, wenn man eigene Projekte erstellen möchte. Lassen Sie uns deshalb einen anderen Ansatz wählen und direkt mit den Registern arbeiten.

MAX7219-Module

Sie können den nackten Chip in einem DIP-Gehäuse oder im SMD-Format kaufen, aber es ist praktischer und billiger, ein fertiges Modul bei eBay oder ähnlichen Websites zu erwerben. Diese Module haben nämlich schon ein 8 x 8 LED-Array auf der Platine (**Bild 1**). Auf solchen typischen Entwicklungsplatinen gibt es fünf Anschlüsse: VCC = 5 V, GND = 0 V, DIN = SPI-Dateneingang, CS = Chip Select und CLK = SPI-Takteingang. Sie sehen auch, dass es zwei fünfpolige Anschlüsse gibt. Der linke, der dem Chip am nächsten ist, wird für die Kommunikation mit dem Board verwendet. Der zweite auf der rechten Seite kann verwendet werden, um mehrere Module in Reihe zu schalten, um ein größeres Display zu erstellen.

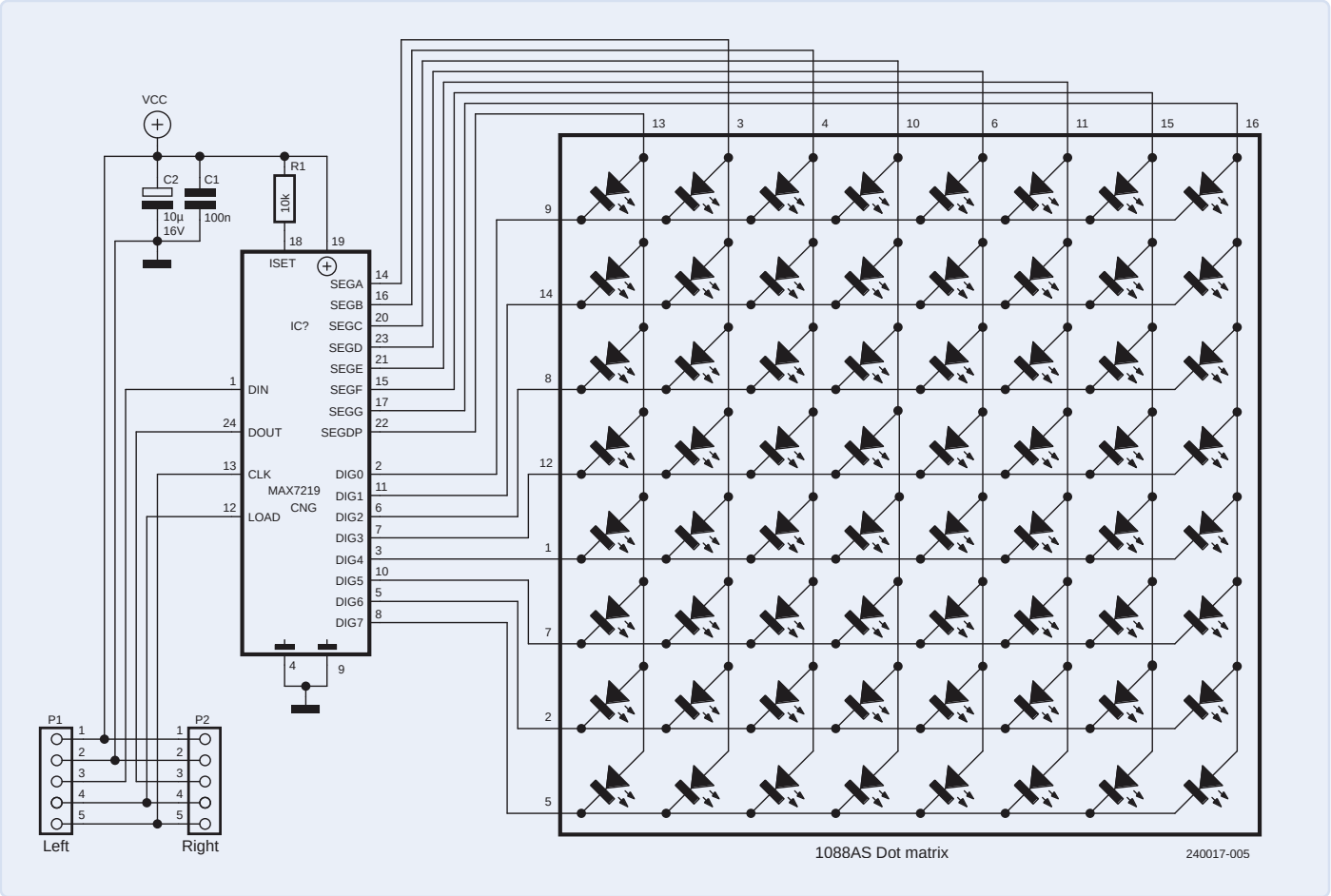


Bild 2. Schaltplan des Moduls.

Schaltplan

Der Schaltplan des Moduls ist in **Bild 2** dargestellt. Er ist sehr einfach: Der Chip wird über Pin 19 (VCC, 5 V) und Pin 4 und Pin 9 (Masse) mit Strom versorgt. Die Pins 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10 und 11 führen zu den LED-Kathoden, die im Datenblatt als Dig 0 bis Dig 7 bezeichnet werden, da sie auch zur Ansteuerung von Siebensegmentanzeigen dienen können. Die Pins 14, 15, 16, 17, 20, 21, 22 und 23 führen zu den LED-Anoden und werden im Datenblatt als SEG A bis SEG DP bezeichnet. Über Pin 18 wird die maximale Helligkeit aller LEDs eingestellt, indem dieser Pin über einen Widerstand (typischerweise 10 kΩ) mit der positiven Versorgungsspannung verbunden wird. Die Pins 1, 12 und 13 sind die SPI-Eingänge. Wenn Sie selbst eine Schaltung aufbauen, bringen Sie die Kondensatoren C1 und C2 so nah wie möglich an den Versorgungspins des Chips an.

Ein wenig zu Registern

Die meisten Display-Treiber wie der MAX7219 zeigen nach dem Einschalten nichts am Ausgang an. Sie müssen mit dem Chip kommunizieren, um ihn zu konfigurieren und um ihm Daten zu senden. Dies geschieht in der Regel mit einem Mikrocontroller oder Computer über eine serielle Schnittstelle. Diese Chips sind eher register- als befehlsgesteuert; sie werden durch das Laden von Daten in ihre Register eingerichtet und gesteuert. Es gibt 13 Register, die über einen seriellen Bus zugänglich sind. Das ist nicht so schwer, wie es klingt, wenn man weiß, was man mit Python oder einer anderen Hochsprache tun muss. Wenn Sie die Register einmal eingerichtet haben, müssen Sie sie nicht jedes Mal neu schreiben, wenn Sie eine neue LED zum Leuchten bringen oder eine andere Änderung an der Anzeige vornehmen wollen. In der Praxis erstellen Sie eine Setup-Routine, die am Anfang Ihres Programms ausgeführt wird, und senden dann Daten nur an die Register, die geändert werden müssen.

Serielle Kommunikation mit Chips und Sensoren

Während einige ICs Daten über einen parallelen Bus empfangen können (wobei mehrere, zum Beispiel acht Datenleitungen gleichzeitig verwendet werden), ist die serielle Kommunikation üblicher. Die drei wichtigsten seriellen Schnittstellen in Embedded-Systemen sind UART [3], I²C [4] und SPI [5]. Der MAX7219 verwendet SPI, was ein relativ einfaches Protokoll ist, wenn man sich erst einmal damit vertraut gemacht hat. Wenn Sie SPI verwenden, sollte Sie das Datenblatt des ICs lesen, um herauszufinden, was für Ihren speziellen Fall erforderlich ist. Im Gegensatz zum UART muss die Geschwindigkeit (Baudrate) eines SPI-Busses nicht festgelegt werden, obwohl es manchmal notwendig sein kann, den Bus von seiner Standardeinstellung zu verlangsamen, wenn beispielsweise eine lange Leitung den Haupt-Controller mit dem MAX7219-Chip verbindet. Abgesehen von der üblichen Masseverbindung (GND, Pin 4) verwendet SPI zwei Leitungen, um Daten zum und vom Chip zu senden: eine Datenleitung (DATA IN/DIN, Pin 1) und eine Taktleitung (CLK, Pin 13). Eine dritte Leitung namens LOAD (Pin 12) wird zum Zwischenspeichern der letzten 16 Datenbits zur positiven Flanke verwendet. Die SPI-Daten, die zur Ansteuerung des MAX7219-Chips benötigt werden, sind recht einfach. Man sendet 16 Datenbits an den Chip und setzt den LOAD-Pin kurzzeitig auf high, um die Daten in den Chip zu laden. Wenn Sie den MAX7219 verwenden, senden Sie nur Daten an den Chip; eine Antwort vom MAX7219 ist nicht vorgesehen.

5-V- oder 3,3-V-Logik

Im Allgemeinen müssen die Betriebsspannungen der beiden ICs, die miteinander kommunizieren, gleich sein, zum Beispiel 5 V oder 3,3 V. Das Datenblatt des MAX7219 gibt eine Nennbetriebsspannung von 5 V (4 V bis 5,5 V) an, und wenn Sie einen der Mikrocontroller mit einer andere Betriebsspannung verwenden, können Spannungswandler

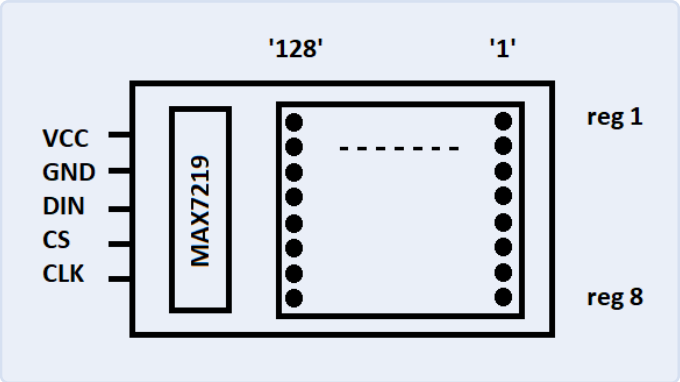


Bild 3. Ausrichtung und Adressierung der LEDs.

erforderlich sein. Das Datenblatt gibt eine minimale *Logic High Input Voltage* (V_{IH}) (Eingangsspannungsbereich für ein logisches High), von 3,5 V an. Der 3,3-V-High-Pegel eines mit 3,3 V betriebenen Mikrocontrollers ist also im Prinzip nicht hoch genug, doch habe ich festgestellt, dass der Schwellenwert in der Praxis niedriger ist und meine MAX7219-Module gut mit Microchip-PICs oder Raspberry Pi Pico bei 3,3 V genauso gut funktionieren wie bei 5 V, ohne dass Pegelumsetzer erforderlich wären, auch wenn das außerhalb der Spezifikationen des Datenblatts liegt.

Die MAX7219-Register

Der MAX7219 verfügt über 13 Register, die Sie steuern müssen. Jedes Register besteht aus acht Datenbits und einer 8-Bit-Adresse.

- Register 1 legt den Zustand (ein oder aus) der ersten LED-Reihe fest. Seine Adresse ist 00000001 in binärer Form.
- Die folgenden Register 2...8 mit den Adressen 00000010 bis 00001000 stellen die anderen LED-Reihen von der zweiten bis zur achten Reihe ein.
- Register 9 (Adresse: 00001001) stellt den Dekodiermodus für Daten ein, die für 7-Segment-Anzeigen bestimmt sind.
- Register 10 (Adresse: 00001010) stellt die Helligkeit ein
- Register 11 (Adresse: 00001011) stellt eine Scan-Grenze ein
- Register 12 (Adresse: 00001100) stellt den Abschalt-/Startmodus ein
- Register 13 (die Adresse lautet 00001111 und nicht 00001101!) wird zum Testen der Anzeige verwendet.

Das Register an der Adresse 00000000 bewirkt nichts, wenn Sie nur ein MAX7219-Modul verwenden und wird daher als No-op-Register bezeichnet. Dieses Register kann bei der Kaskadierung mehrerer MAX7219 verwendet werden, ich werde es später kurz erwähnen. Weitere Details zu all diesen Registern finden Sie im Datenblatt und in den Kästen **Weitere Einzelheiten zu den Registern 9...13** und **Kaskadierung mehrerer MAX7219-Module**.

Modul-Ausrichtung

Wenn man das in diesem Artikel gezeigte Modul in der gleichen Ausrichtung wie in **Bild 3** hält, mit dem Chip auf der linken Seite, entspricht das Register 1 der obersten LED-Reihe, und die LED, die dem niederstwertigen Bit (LSB) der acht Datenbits entspricht, ist die LED, die am weitesten vom MAX7219 entfernt ist, auf der rechten Seite.

Verwendung der Register

Die SPI-Daten werden als 16 Bit breites Wort auf einmal gesendet. Zuerst muss die Registeradresse gesendet werden, dann die Daten, die Sie im Register speichern wollen. Beim MAX7219 muss das höchstwertige Bit (MSB) der Daten zuerst gesendet werden. Dies lässt sich im Code des Controllers leicht einrichten. Wenn Sie zum Beispiel jede zweite LED in der dritten LED-Reihe auf ON setzen wollen, müssen Sie Folgendes an den Chip auf dem SPI-Bus senden: 00000011 10101010. Die Adresse des dritten Registers ist 00000011, während 10101010 die abwechselnd einzuschaltenden LEDs steuert.

MSB zuerst und SPI-Konfiguration

Die Anforderung, das höchstwertige Bit zuerst zu senden, kann zu Verwirrung führen. Die SPI-Peripherie auf dem verwendeten Mikrocontroller hat andere Einstellungen, die manchmal geändert werden müssen, etwa ob die Daten bei der fallenden oder steigenden Flanke der Impulse erkannt werden. In vielen Fällen kann die von Ihnen verwendete Hochsprache dies für Sie erledigen. Die Standardeinstellungen funktionieren oft, sehen Sie in der Dokumentation Ihres Mikrocontrollers nach.

Beispiel in PIC-BASIC

Ich finde, der PIC-BASIC-Compiler von Crownhill [6] ist sehr angenehm zu benutzen. Ich verwende ihn mit PIC16F877-Chips, die zwar schon sehr alt, aber immer noch sehr nützlich für das Prototyping sind. Hier ist eine beispielhafte Codezeile in PIC BASIC, um den SPI-Code vom PIC an den MAX7219 zu senden, von Portpin B.2, MSB zuerst, an den MAX7219:

```
SHOut PORTB.2, PORTB.0, MsbFirst, [%0000010111111111]
```

Kaskadierung mehrerer MAX7219-Module

Der MAX7219 verfügt über eine clevere Funktion, mit der mehrere Chips angesteuert werden können, um größere LED-Anordnungen zu schaffen. Auf diese Weise können Sie Platinen miteinander verbinden, um eine lange LED-Anzeige zu erstellen, wie sie in LED-Laufschriften verwendet wird, wie man sie in Bussen und Zugschildern sieht. Dazu wird der Data-Out-Pin des ersten Moduls mit dem Data-In-Pin des folgenden Moduls verbunden. Die Daten, die jeder Chip an seinem Data-In-Pin empfängt, erscheinen 16 Taktzyklen später an seinem Data-Out-Pin. Wenn Sie zum Beispiel zwei MAX7219-Module wie beschrieben verbunden haben, kommunizieren Sie mit ihnen, indem Sie zwei 16-Bit-Wörter hintereinander senden. Die Daten werden Bit-für-Bit von einem Chip zum anderen verschoben. Danach sendet man einen Impuls an den CS-Pin, um die Daten zu verriegeln. Der erste Chip (der dem Mikrocontroller am nächsten liegt) speichert also die letzten 16 Bits, die gesendet wurden, während der zweite Chip die ersten 16 Bits speichert. In diesem Fall ist das No-Op-Register (Adresse 00000000) nützlich: Um nur den zweiten Chip zu adressieren, senden Sie ihm das gewünschte 16-Bit-Wort, gefolgt von einem No-Op-Befehl (sechzehn Nullen). Auf diese Weise erhält der zweite Chip die gewünschten Daten und für den ersten Chip ändert sich nichts. Dies kann auf eine beliebige Anzahl von MAX7219 erweitert werden, der einzige limitierende Faktor ist, dass es unpraktisch werden kann, Zahlen mit einer großen Anzahl von Bits zu schreiben. Während diese Methode die Verdrahtung sehr einfach macht, wird das Programmieren etwas komplexer. Für meinen 8-×-8-×-8-LED-Würfel habe ich, da der Raspberry Pi Pico viele Ausgangsanschlüsse hat, stattdessen alle SPI-Datenleitungen zusammen verdrahtet, so dass alle Chips die Daten auf einmal erhalten, aber nur die Chip-Select-Pins (LOAD) auf den 8-×-8-Matrizen auswählen, die ich gleichzeitig ansprechen wollte.

Diese Zeile sendet einen Strom von 16 Bits, zuerst die Adresse (00000101, also 5) und dann die Daten (alles Einsen). Dies schaltet alle LEDs in Reihe fünf ein.

Beispiel in MicroPython auf dem Raspberry Pi Pico

In einigen Versionen von MicroPython gibt es für den MAX7219 geschriebene Module, mit denen man Linien, Quadrate, Buchstaben, Zahlen und Ähnliches auf das LED-Array zeichnen kann. Ich werde nicht auf diese Bibliothek eingehen, da ich ja hier im Detail erklären möchte, wie man die Register selbst adressiert und so die volle Kontrolle über den Chip und die LEDs erhält. Verbinden Sie Pin 4 (GP2 = CLK), Pin 5 (GP3 = DATA) und Pin 21 (GP16 = CS/LOAD) mit den entsprechenden Pins des MAX7219-Moduls, wie in **Tabelle 1** zusammengefasst. Für MicroPython müssen Sie Code für die SPI-Funktion durch Hinzufügen von `from machine import Pin, SPI` am Anfang Ihres Programms importieren. Der Python-Code, der die gleichen SPI-Daten wie im vorherigen Beispiel an den MAX7219 sendet, lautet dann

```
from machine import Pin, SPI
buff = [0,0]
buff[0] = 0b00000101
buff[1] = 0b11111111
spi.write(bytearray(buff))
```

Tabelle 1: Pins und Anschlüsse

Pi Pico Pin-Nnummer	Pi Pico Portpin-Bezeichnung	MAX7219 Platinenanschluss
4	GP2	CLK
5	GP3	DIN (DATA)
21	GP16	CS (LOAD)
40	VBUS	VCC (+5 V)
38	GND	GND (0 V)

Weitere Beispiele

Die obigen Codeschnipsel veranschaulichen den wichtigsten Teile; vollständige Programme finden Sie auf meiner Website [7]. In beiden Beispielen müssen Sie noch einen positiven Impuls auf den Chip-Select-Pin (CS oder LOAD) geben, um die Daten in das Register zu laden. Dies kann einfach geschehen durch:

```
cs.value(1)
utime.sleep(0.001)
cs.value(0)
```

Programme schreiben

Bevor Sie damit beginnen, die LEDs für Ihr Display anzusteuern, sollten Sie eine Setup-Subroutine erstellen, die alles so einrichtet, wie Sie es möchten. Führen Sie diese am Anfang Ihres Programms aus; danach können Sie die LEDs in jeder Zeile, die Sie ändern wollen, einfach adressieren, indem Sie das entsprechende Register umschreiben. Die Register können in beliebiger Reihenfolge geschrieben werden. In **Listing 1** sehen Sie mein Setup-Modul `setup_max7219()`, das auch auf meiner Website verfügbar ist. Der erste Teil ist eine Schleife, die Nullen

Listing 1: Ein Setup-Modul

```
from machine import Pin, SPI
import utime
import urandom
spi_sck = Pin(2)
spi_tx = Pin(3)
spi_rx = Pin(0)
spi = SPI(0, sck=spi_sck, mosi=spi_tx, bits=8,
miso=spi_rx, baudrate=100000, firstbit=SPI.MSB)
cs = Pin(16, Pin.OUT)
cs.value(0)

# chip select 'pulse'
def cs_ping_set():
    cs.value(1)
    utime.sleep(.001)
    cs.value(0)

def setup_max7219():
    for i in range (1,9):
        # Note: zero = nop
        # clear led rows 1 to 8
        # in registers 1 to 8
        buff = [0,0]
        buff[0] = i
        buff[1] = 0b00000000
        spi.write(bytearray(buff))
        cs_ping_set()

    # set shutdown to start
    # register 9
    buff = [0,0]
    buff[0] = 0b00001100
    buff[1] = 0b00000001
    spi.write(bytearray(buff))
    cs_ping_set()
    # adjust brightness
    # register 10
    buff = [0,0]
    buff[0] = 0b00001010
    buff[1] = 0b00001111
    spi.write(bytearray(buff))
    cs_ping_set()
    # scan limit register -set all rows and col.s
    # register 11
    buff = [0,0]
    buff[0] = 0b00001011
    buff[1] = 0b00000111
    spi.write(bytearray(buff))
    cs_ping_set()
    # set decode mode
    # register 12
    buff = [0,0]
    buff[0] = 0b00001001
    buff[1] = 0b00000000
    spi.write(bytearray(buff))
    cs_ping_set()
    # set test mode off
    # register 13 but Note address 15
    buff = [0,0]
    buff[0] = 0b00001111
    buff[1] = 0b00000000
    spi.write(bytearray(buff))
    cs_ping_set()
```

Bild 4. Der LED-Würfel.

an die Register 1...8 sendet, was alle LEDs ausschaltet. Dann wird das Register 9 (Dekodiermodus) auf 0 gesetzt, so dass der MAX7219 für einzelne LEDs (und nicht für Sieben-Segment-Anzeigen) eingerichtet ist, dann wird das Register 10 (Helligkeit) auf den höchsten Wert 15 gesetzt (1111), das Register 11 (Scan-Limit) auf 7 (alle LED-Reihen verwenden), das Register 12 (Herunterfahren) auf 0 und schließlich das Register 13 (Testmodus) ebenfalls auf 0.

Löschen des Displays

Eine weitere wichtige Funktion ist die Möglichkeit, die gesamte LED-Matrix auf einmal zu löschen, ohne die anderen Einstellungen zu ändern. Dazu wird einfach eine Schleife erstellt, die Nullen (alle LEDs AUS) an die ersten acht Register (Register 1...8) sendet. SPI ist recht schnell, so dass bei Bedarf alle acht Register innerhalb weniger Millisekunden zurückgesetzt werden können, so dass das Display für das menschliche Auge ohne spürbare Verzögerung dunkel wird.

Lauflichter-Beispiele

Nehmen wir an, Sie wollen alle LEDs in einer Reihe zum Leuchten bringen und dann diese Reihe von leuchtenden LEDs über die Anzeige bewegen. Zuerst sollten Sie das Display zurücksetzen. Dann müssen Sie 11111111 (alle LEDs = EIN) an Register 1 senden. Nach einer Pause löschen Sie die LED-Matrix erneut und senden die gleichen Daten an Register 2 und so weiter. Schreiben Sie eine Schleife, so dass Sie alle acht Register abarbeiten können, und Sie erhalten eine schöne Darstellung, bei der die LEDs über das Display wandern. Wenn Sie das Löschen der LEDs nach jedem Register auslassen, erzeugt der Code einen wachsenden Vorhang aus LED-Lichtern, der über das Display herabfällt. Die Pausenverzögerung bestimmt, wie schnell die Lichter über das Display wandern. Dies wird in **Listing 2** gezeigt. Um das Programm kürzer zu machen, habe ich hier wieder die Funktion `setup_max7219()` verwendet, um die Anzeige zu löschen. Das funktioniert gut; und obwohl die Register 9...13 jedes Mal unnötigerweise geschrieben werden, macht das für das menschliche Auge keinen Unterschied. Eine andere Möglichkeit wäre, eine eigene `clear_screen()`-Funktion zu schreiben.

Wenn Sie die LEDs in Spalten statt in Reihen blinken lassen wollen (also das, was wir gerade gemacht haben, aber 90 Grad gedreht), dann müssen Sie 00000001 an alle Register senden. Tun Sie dies in einer Schleife. Dadurch wird nur die erste LED jeder Reihe auf EIN gesetzt, wodurch eine Spalte mit aktiven LEDs entsteht. Verwenden Sie die Schleife dann, um 000000010 an alle Register zu senden, dann 00000100, und so weiter. Sie könnten dafür bitweises Schieben verwenden, aber in dem gezeigten Beispiel habe ich für den gleichen

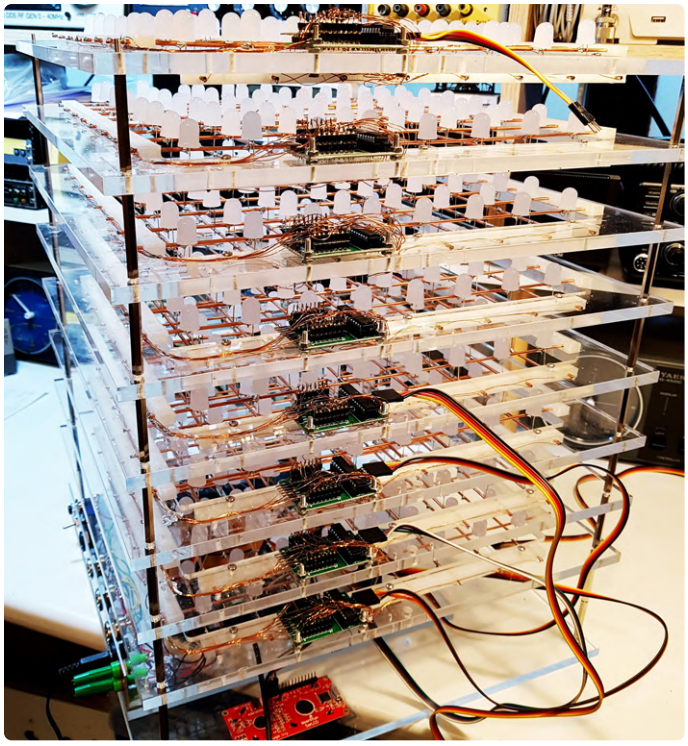


Bild 5. Die Seitenansicht zeigt acht MAX7219-Module.

Zweck einfach zunehmende Zweierpotenzen verwendet, wie 2^1 = 2 = 0b00000010, 2^2 = 4 = 0b00000100. Sie brauchen die Anzeige nicht jedes Mal zu löschen, da Sie ja alle Register während des Ablaufs ändern. Auch hier bestimmt die Pausenverzögerung, wie schnell die Lichter über die LED-Matrix wandern. Indem Sie mit den Werten der Bits spielen, die Sie an die acht Register 1...8 senden, können Sie alle Arten von wunderbaren Mustern, Blitze oder Lichtvorhänge erzeugen. Sie können auch die Zufallsfunktion in Python verwenden, um schöne visuelle Effekte zu erzeugen. Sehen Sie sich die anderen Beispiele auf meiner Website [7] an, die Simulationen von Wellen, Blitzen, Flammen, Zufallsbewegungen und sogar einige mathematische Projekte umfassen.

Intelligentes Lehren: Skalare, Vektoren, Matrizen, Tensoren

Vor kurzem habe ich in Zusammenarbeit mit der Universität Sussex (Großbritannien) ein Spiel entwickelt, das Schülern und Studenten helfen soll, Vektoren, Matrizen und Tensoren zu verstehen. Das Spiel kennt auch in einen „Demo-Modus", um andere Aspekte der Mathematik zu demonstrieren. Das Gerät in **Bild 4** ist ein Würfel aus acht

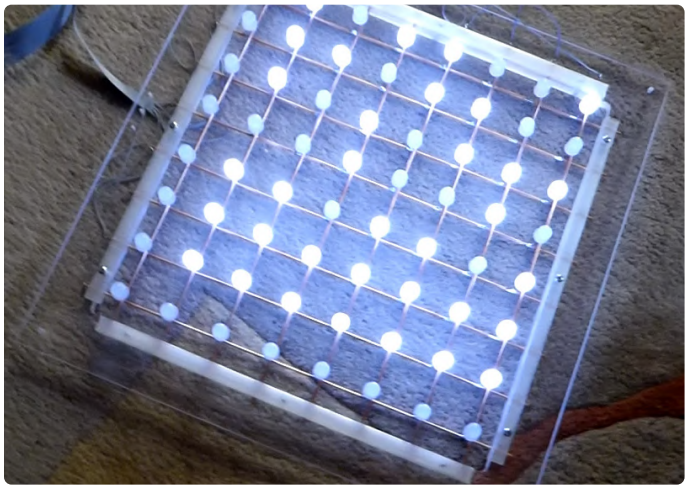


Bild 6. Eine der acht Schichten.

Listing 2:
Über das Display wandernde Lichtpunkte

```
# display set-up
setup_max7219()
while True:
# sweep rows
    for j in range(1,9):
        buff = [0,0]
        buff[0] = j    # register no.
        buff[1] = 255  # value (all ON)
        spi.write(bytearray(buff))
        cs_ping_set()
        utime.sleep(.2)

        setup_max7219()  # clear screen
# sweep columns
    for k in range(0,8):
        for l in range(1,9):
            buff = [0,0]
            buff[0] = l    # register no.
            buff[1] = 2**k  # value 2^k
            spi.write(bytearray(buff))
            cs_ping_set()
        utime.sleep(.2)

    setup_max7219()  # clear screen
```

Einzelheiten zu den Registern 9...13

- **Register 9** legt den Dekodiermodus fest. Sie können den MAX7219-Chip so konfigurieren, dass er entweder LED-Reihen oder 7-Segment-Anzeigen ansteuert. Die Standardeinstellung ist eine einzelne LED-Reihe (siehe Register 11 unten). Im Dekodiermodus können Sie 7-Segment-Anzeigen direkt ansteuern, was die Programmierung erleichtert: Wenn Sie zum Beispiel „00000000“ als Daten senden, was dezimal eine Null ist, werden sechs der Ausgänge eingeschaltet, um die Segmente A...F der 7-Segment-Anzeige anzusteuern und eine Null zu erzeugen; dasselbe gilt für die anderen Dezimalziffern 1...9 und einige andere Symbole (siehe Datenblatt).
- Über **Register 10** wird die Helligkeit der LEDs eingestellt. Der Chip verwendet Pulsweitenmodulation (PWM) zur Steuerung der LED-Helligkeit. Es gibt 32 Stufen, wobei das untere Nibble die Helligkeit steuert: 0000 ist die geringste Helligkeit (1:32 PWM) und 1111 ist fast voll eingeschaltet (31:32 PWM). Die Einstellung mit der geringsten Helligkeit kann beispielsweise als Nachtmodus verwendet werden, aber denken Sie daran, sie später wieder auf volle Helligkeit zu stellen.
- **Register 11** legt die Anzahl der verwendeten LED-Reihen fest wollen. Wenn der Chip eingeschaltet wird, ist er so eingestellt, dass er nur eine Zeile von acht LEDs ansteuert. Wenn Sie eine einzelne Reihe von acht LEDs (oder eine einzelne 7-Segment-Anzeige) ansteuern wollen, stellen Sie das Register auf 00000000. Um alle acht Reihen (64 LEDs) zu verwenden, setzen Sie dieses Register auf 00000111 und so weiter.
- **Register 12** und **Register 13** können verwendet werden, um die Anzeige abzuschalten (zum Beispiel um Strom zu sparen) und um einen Testmodus auszuführen, der überprüft, ob alle LEDs richtig funktionieren. Beachten Sie, dass die meisten Register eine binäre Adresse haben, die ihrer dezimalen Registernummer entspricht, aber nicht diese beiden: Ihre Adresse ist 00001111, also 15, nicht 13.

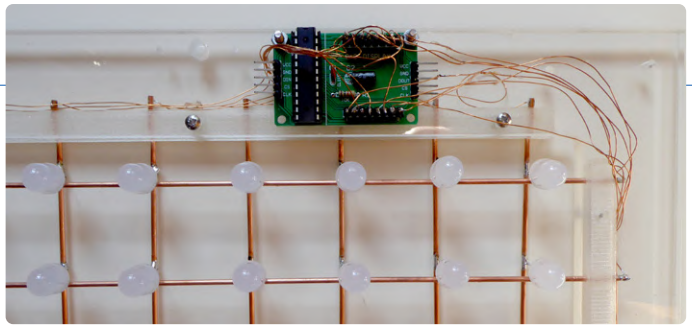


Bild 7. Verbindungen zu den Zeilen und Spalten.

MAX7219-Modulen (**Bild 5**), von denen jedes Modul 64 weiße 10-mm-LEDs ansteuert, also insgesamt 8 × 8 × 8 = 512 LEDs! Da die LEDs entweder an oder aus sind, handelt es sich um binäre Arrays. Das Spiel richtet sich an 10- bis 16-Jährige, ist aber auch für ein breiteres Altersspektrum geeignet, wie wir bei MINT-Familienveranstaltungen (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik) feststellen konnten. Jede Ebene (**Bild 6**) wird aus transparenten Acrylplatten (Plexiglas) und Kupferrohren gebaut, wie unten beschrieben. Alles wird von einem Raspberry Pi Pico mit MicroPython gesteuert.
Programmierbare, seriell adressierbare RGB-LEDs wären eine nette Option gewesen, aber ich habe keine klassisch bedrahteten mit 10 mm Durchmesser gefunden. Das Spiel enthält vier Bänke mit acht Schaltern; drei davon werden von den Teilnehmern zur Eingabe von x-, y- und z-Daten für das Spiel verwendet; die vierte für die Auswahl des Spielmenüs. Weitere Einzelheiten finden Sie auf meiner Website und auf meinem YouTube-Kanal [8]. Ich möchte dem Team von Prof. Hazel Cox an der University of Sussex (GB) danken, darunter Prof. Michael Melgaard und Dr. Yevgen Petrov, Brice Kammegne und Tom Baird-Taylor. Dank auch an das *Lewes STEM Festival*. Dieses Matrix-Tensor-Spiel-Projekt wurde durch einen *APEX Public Engagement Award* der Royal Society finanziert.

Ein größeres Display bauen

Wenn Sie Ihr eigenes 8 × 8-LED-Display bauen wollen (etwa um es zu vergrößern), wie ich es beim 8 × 8 × 8-LED-Würfel getan habe, lohnt es sich, ein fertiges MAX7219-Modul zu verwenden. Entfernen Sie einfach die eingebaute LED-Anzeige und löten Sie die Anschlüsse für Ihr Display an (**Bild 7**). Sie müssen eine Matrix aus LEDs erstellen, bei dem alle Anoden mit acht gemeinsamen Stromschienen (Sie brauchen keine Strombegrenzungswiderstände) und die Kathoden mit weiteren acht gemeinsamen Schienen verdrahtet sind. Ich habe dafür 2-mm-Kupferrohre verwendet (anstelle von Stäben oder Drähten, die viel einfacher zu löten sind, aber nicht so eindrucksvoll aussehen), die mit Hilfe von 3D-gedruckten Leisten auf einem Stück transparentem Acryl befestigt wurden. Die acht Anodenschienen und acht Kathodenschienen können mit dünnerem Draht an die entsprechenden Pins des Moduls angeschlossen werden. Sobald die 64 LEDs verdrahtet sind, schließen Sie die SPI-Leitungen und die Versorgungsanschlüsse an (**Bild 8**), und schon kann es losgehen. Ich hoffe, dieser Artikel inspiriert Sie dazu,

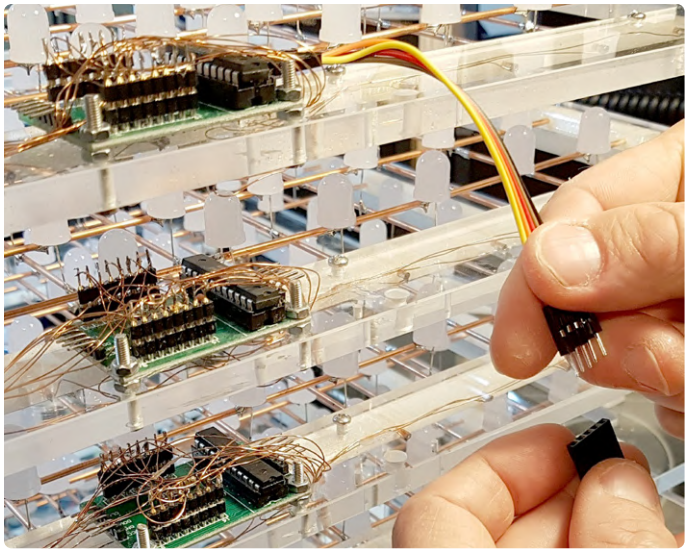


Bild 8. Zusammenstecken der Module.

sich ein Set von MAX7219-Modulen (siehe **Passende Produkte**) zu besorgen, zu experimentieren und damit Spaß zu haben!

SG – 240017-02

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Anmerkungen zu diesem Artikel? Schicken Sie bitte eine E-Mail an den Autor unter jphcreativescience@gmail.com oder kontaktieren Sie die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.

Über den Autor

Dr. Jonathan Hare ist ein freiberuflicher Wissenschaftler und Wissenschaftsjournalist. Seine Doktorarbeit mit Sir Harry Kroto führte zu einer Methode zur Synthese von Buckminster-Fulleren-Molekülen (C60), die wegen ihrer ungewöhnlichen Form oft als „Fußballmolekül" bezeichnet werden. Jonathan ist derzeit Visiting Outreach and Public Engagement Fellow in der Chemiefakultät der Universität Sussex. Er war auch schon in verschiedenen BBC-Sendungen zu sehen, zum Beispiel in Rough Science, Coast und Horizon. Seine Hobbys sind Basteln, Jonglieren, Bergwandern, Amateurfunk, Malen und natürlich Elektronik. Weitere Einzelheiten finden Sie auf seiner Website [9].

Passende Produkte

- **Dogan Ibrahim, *Raspberry Pi Pico Essentials* (Elektor, 2021)**
  www.elektor.de/19673
- **MAX7219 Punktmatrix-Modul (8er-Set)**
  www.elektor.de/18422

WEBLINKS

[1] Datenblatt MAX7219: https://tinyurl.com/5n6nbyv6
[2] Demo Tensor-Game: https://www.youtube.com/watch?v=VaoEBamceXg
[3] UART (Wikipedia): https://de.wikipedia.org/wiki/Universal_Asynchronous_Receiver_Transmitter
[4] I²C (Wikipedia): https://de.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C
[5] SPI (Wikipedia): https://de.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface
[6] Compiler PIC-BASIC: https://www.crownhill.co.uk/pic_basic
[7] Python-Beispiele auf der Webseite des Autors: http://www.creative-science.org.uk/max7219.html
[8] YouTube-Kanal des Autors: https://www.youtube.com/@jonathanhare6644
[9] Webseite des Autors: https://www.zoomscience.co.uk

embeddedworld
Exhibition&Conference
UNITED
CONNECTING THE
EMBEDDED COMMUNITY
11.–13.3.2025
NÜRNBERG, GERMANY
Get your
free ticket now!
embedded-world.de/code
Use the voucher code GGew25
Medienpartner
elektroniknet.de
Markt&Technik
Elektronik
Elektronik automotive
Elektronik medical
connect professional
NÜRNBERG MESSE

Projekt 2.0

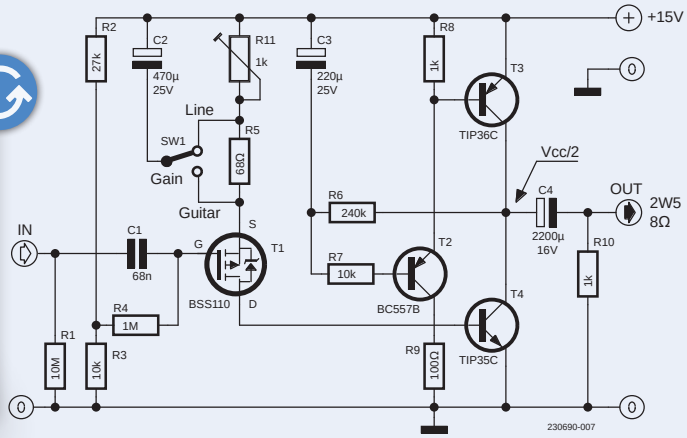
Korrekturen, Updates und Leserbriefe

Zusammengestellt von Jean-François Simon (Elektor)

Kleiner Klasse-A-Audioverstärker mit Stromausgang

Elektor Circuit Special 2024, S. 32 (230690)

Im Schaltplan wurde der MOSFET T1 zwar richtig gezeichnet, aber die Beschriftungen für Drain und Source wurden versehentlich vertauscht. Im nebenstehenden korrigierten Schaltplan ist es richtig.

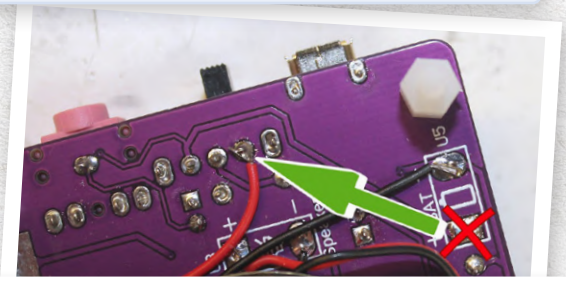


Ein GSM-Alarm

Elektor 7-8/2024, S. 34 (230650)

Hier ist ein Update zu einem Thema, das ich vergessen habe, im Artikel zu erwähnen. In vielen Ländern wird das 2G/3G-Netz schrittweise abgeschafft. In Frankreich hat Orange angekündigt, dass der Dienst im Jahr 2025 eingestellt wird; SFR und Bouygues haben es für 2026 angekündigt. Free verfügt über keine eigene 2G-Infrastruktur, sondern nutzt das Roaming-Netz von Orange. Einige Free-Nutzer haben jedoch schon jetzt keinen Zugang mehr zu 2G-Diensten. Was mich betrifft, so funktioniert mein Wecker noch. Die nachhaltigste Option wäre natürlich die Aktualisierung der Hardware. Ich habe einige Nachforschungen über das GL09-Modem angestellt und eine neue 4G-Version gefunden (www.google.com/search?q=GL09+4G). Ich habe es nicht ausprobiert, aber das neue Modul scheint mit dem alten voll kompatibel zu sein. Eine Suche auf den üblichen chinesischen Websites sollte einen günstigeren Preis ergeben.

Pascal Rondane (Autor des Artikels)



Modifikation eines RDA5807-basierten FM-Radio-Bausatzes

Elektor Reverse Project #1
(E-zine Exclusive, Juni 2024, S. 4, 240196)

Wie im Artikel erwähnt, bietet das Radio-Kit keinen Schutz für die Batterien, wenn gleichzeitig USB angeschlossen ist. Daher müssen die Batterien entfernt werden, wenn eine USB-Stromversorgung verwendet wird, um eine Zerstörung der Batterien zu vermeiden. Eine einfache, aber wirksame Lösung besteht darin, das Pluskabel (rot) des Batteriehalters mit dem unbenutzten Pin des An/Aus-Schalters zu verbinden (statt mit dem Anschluss U5, siehe beigefügtes Foto). Der Nachteil dieser Lösung ist, dass man das Radio nicht ausschalten kann, wenn beide Stromversorgungen angeschlossen sind, aber die Batterien werden zumindest nicht explodieren.

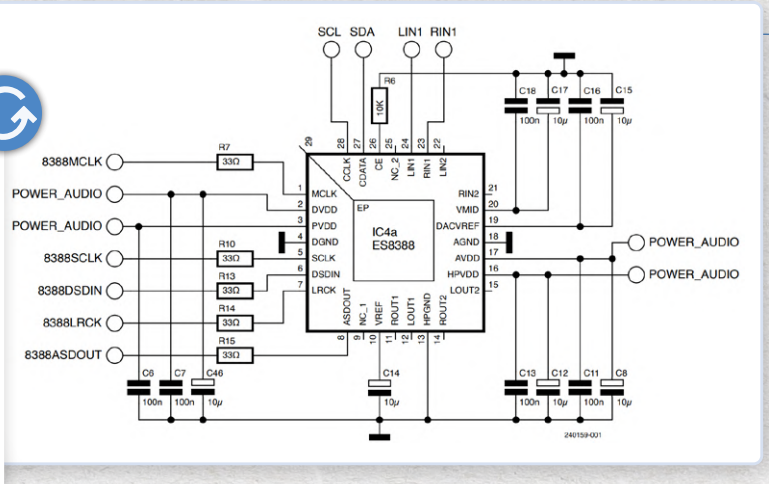
E.G. (Niederlande)

Vielen Dank für diesen sicheren Vorschlag!
Clemens Valens (Elektor)

Stereo-Audio-Codec für ESP32 und Co.

Elektor Circuit Special 2024, S. 96 (240159)

Im Schaltplan hat sich ein Fehler eingeschlichen, wofür wir uns entschuldigen! Alle Elkos in Bild 1 wurden falsch gepolt gezeichnet. Die richtige Polarität ist nebenstehend dargestellt. Auch die Nennspannung dieser Kondensatoren war im Artikel nicht angegeben. Da der ES8388 ein Bauteil mit einer Nennspannung von (maximal) 3,3 V ist, sind Kondensatoren mit Nennspannungen von 6,3 V oder 10 V ausreichend.



Projekt 2.0 - Universeller Gartenlogger / Wetterstation Sensoren

Elektor 9-10/2024, S. 109 (240397)

Ich habe viele Jahre Erfahrung mit Wettersensoren und möchte dazu eine Anmerkung machen. Nach meiner Erfahrung ist keiner dieser Sensoren für die Messung der Regenmenge geeignet. Weder die Bestimmung des Wassergewichts noch das Zählen der Tropfen mit einem Tausensor funktioniert.

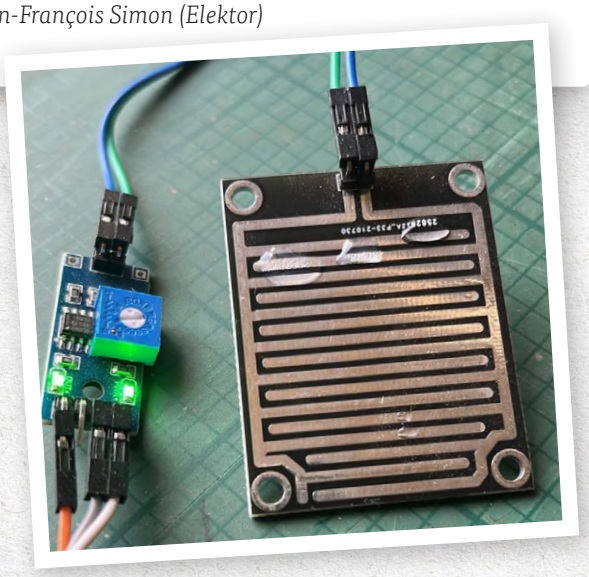
Der Tausensor mit der Fingerstruktur ist gut zu gebrauchen, wenn man Nebel, Tau, Schnee und einsetzenden Regen erkennen will. Allerdings muss an der Unterseite eine Heizung angebracht werden, um den Sensor wieder zu trocknen. Kleine Widerstände, die bei Erkennung von Niederschlag für eine bestimmte Zeit eingeschaltet werden, sind dazu ausreichend.

Für die Niederschlagsmessung ist ein Kippwaagen-Sensor die Methode der Wahl. Wenn eine Seite voll ist, kippt er um und gibt einen Impuls ab, und die andere Seite kann sich über den Trichter füllen. Damit ist auch sichergestellt, dass kein Regen verloren geht. Im Winter sollte der Trichter mit dem Kippmechanismus natürlich beheizt werden, damit der Schnee schmilzt und der Mechanismus nicht einfriert. Hierfür eignen sich Heizfolien, wie sie für Autospiegel erhältlich sind. Übrigens sind diese Kipplöffelsensoren auch bei verschiedenen Händlern weltweit erhältlich.

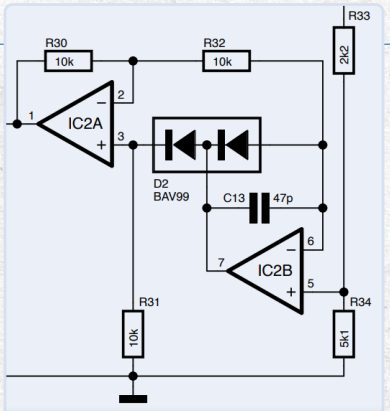
Helmut Bayerlein (Deutschland)

Vielen Dank für Ihre Kommentare. Ich bin sicher, dass Ihre Ideen zur Beheizung der Sensoren im Winter für viele Leser nützlich sein werden. Was die Regenmesser nach dem Kipplöffel-Prinzip (https://t1p.de/j39zh) betrifft, so habe ich auch hier keine Erfahrungen aus erster Hand, aber Ihre Rückmeldung über die Wirksamkeit dieser Sensoren ist sehr willkommen. Ich glaube, dass der von Wim Sanders in der letzten Ausgabe erwähnte Sensor, der nebenstehend in dem hellgrauen Kunststoffgehäuse abgebildet ist, tatsächlich diesen Kipplöffelmechanismus im Inneren verwendet. Fotos von seinem Innenleben sind im Internet verfügbar.

Jean-François Simon (Elektor)



Haben Sie Ideen oder Feedback? Haben Sie eine gute Idee oder ein wertvolles Feedback für Elektor? Melden Sie sich bei uns unter redaktion@elektor.de. Wir sind gespannt auf Ihre Meinung!



Analoger 1-kHz-Generator

Elektor 7-8/2024, S. 89 (230704)

Bei der Neuzeichnung des Schaltplans ist uns ein Fehler unterlaufen. Der rechte Anschluss von R32 geht an den invertierenden Eingang von IC2B; siehe den obigen korrigierten Ausschnitt. Der Eagle-Schaltplan und das Platinenlayout sind korrekt und müssen nicht geändert werden.

Fernüberwachungsgerät für Warmwasserbereiter

Elektor Circuit Special 2024, S. 50 (240039)

Gemäß dem Schaltplan wird die Phase durch die Strommessspule geführt. In Bild 4 ist ein grün/gelber Draht (Schutzleiter) zu sehen. Wenn die elektrischen Vorschriften in Italien dies zulassen, dann sollte dies im Text erwähnt werden.

Dieter Becker (Deutschland)

Vielen Dank für Ihre E-Mail. Ich habe das konkrete Bild (siehe oben) noch einmal überprüft und dabei eine ungewöhnliche Situation festgestellt: Ein (nur) gelber Draht ist vor einem anderen grün/gelben Draht dahinter zu sehen. Wenn Sie das Bild heranzoomen, können Sie die beiden getrennten Drähte erkennen, die in der gedruckten Elektor-Ausgabe nicht so gut zu sehen waren. Das grün-gelbe Kabel führt zu einem isolierten Erdungsanschluss hinter dem Schalter.

Für besondere Verwendungszwecke oder Signalfunktionen ist die Verwendung der gelben Farbe in diesen Fällen in Italien erlaubt, neben anderen Farben. Wie Sie richtig festgestellt haben, ist die Verwendung einer gelb/grünen Leitung (PE) für die Phase natürlich verboten. Ich hoffe, das hilft Ihnen weiter!

Roberto Armani (Elektor)

Magnetische Breitbandantenne für Langwelle

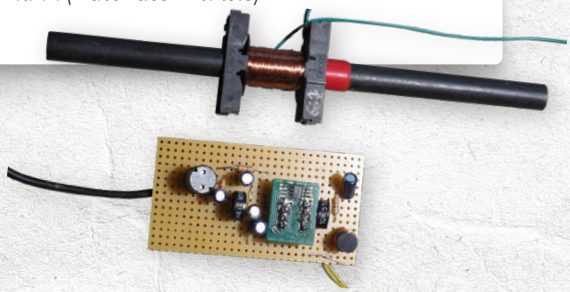
Elektor 9-10/2024, S. 28 (220073)

Ich glaube nicht, dass 20 Windungen Draht für eine Ferritantenne für Langwelle ausreichen. Im Bild 6 scheinen es tatsächlich viel mehr zu sein (200 Windungen?) Könnten Sie das bestätigen oder korrigieren?

Yves Georges (Frankreich)

Bei einer gewöhnlichen Ferrit-Antenne steigt die Spannung mit der Anzahl der Windungen, und die Spannung ist der interessante Parameter. Oft wird ein LC-Schwingkreis mit einem Verstärker mit hoher Eingangsimpedanz verwendet. In meiner Antenne speist die Spule einen Transimpedanzverstärker. Das bedeutet, dass die Antennenspule effektiv kurzgeschlossen ist, und der Strom ist der wichtige Parameter. Erhöht man die Anzahl der Windungen, erhöht sich die Impedanz L und der Strom sinkt. Es ist also nicht sinnvoll, die Anzahl der Windungen zu erhöhen. Ich habe experimentiert und eine Windungszahl von 20 bis 30 als optimal herausgefunden. Es sieht so aus, als gäbe es mehr Windungen, da ich Litzendraht verwendet habe (30 × 0,1 mm Litze parallel).

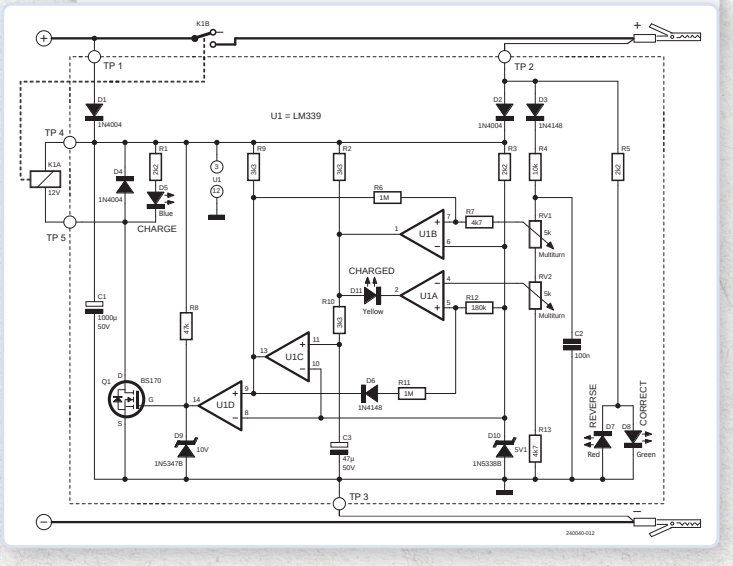
Martin Ossmann (Autor des Artikels)



Autobatterie-Ladegerät aufgemotzt (Teil 2)

Elektor Circuit Special 2024, S. 83 (240040-B)

Im Schaltplan (Bild 1) haben wir vergessen, die im Text erwähnten Testpunkte TP1 bis TP5 zu beschriften. Wir entschuldigen uns für dieses Versäumnis und danken den Lesern, die uns darauf hingewiesen haben. Dem nebenstehenden Schaltplan wurden die Testpunkte nun hinzugefügt.



RG – 240475-02

Treten Sie jetzt der Elektor Community bei!

Jetzt elektor GOLD membership Mitglied werden!

- Zugang zum kompletten Online-Archiv (1970-heute)!
- 8x Elektor Magazin (gedruckt)
- 8x Elektor Magazin (PDF)
- 10% Rabatt im Elektor Store und exklusive Angebote
- Zugriff auf über 5.000 Gerber-Dateien

u.v.m. aus der Projektplattform Elektor Labs

Auch erhältlich

Die digitale elektor GREEN membership Mitgliedschaft!

- Zugang zum kompletten Online-Archiv
- 8x Elektor Magazin (PDF)
- 10% Rabatt im Elektor Store und exklusive Angebote
- Zugriff auf über 5.000 Gerber-Dateien

u.v.m. aus der Projektplattform Elektor Labs

www.elektormagazine.de/abo

elektor design > share > earn

VibroTactile-Handschuhe

Ein Durchbruch für Parkinson-Patienten?

Von Hans Van Essen (Niederlande)

Dieses Projekt ist aus dem siegreichen Beitrag zum Elektor Labs 2024 Project Contest [1] von Hans van Essen hervorgegangen. Seine VibroTactile-Handschuhe für Parkinson-Patienten beeindruckten die Jury mit ihrem innovativen Ansatz zur Verbesserung motorischer Fähigkeiten durch vibro-taktile Stimulation. Die Handschuhe wurden speziell für Parkinson-Patienten entwickelt. Mit Hilfe der Stimulation können motorische Störungen wirksam bekämpft werden. Durch die gezielte Stimulation der Fingerspitzen sorgen diese Handschuhe für Linderung und revolutionieren die Behandlung von motorischen Beschwerden bei Parkinson-Patienten.

Nachdem bei einem Familienmitglied Parkinson diagnostiziert worden war, machte ich mich daran, auf der Grundlage einer Studie von Peter A. Tass [2] ein Paar vibrotaktile Handschuhe zu entwickeln. Es ist bekannt, dass bei Parkinson-Patienten die Gehirnzellen eine Art Synchronizität [13] aufweisen. Wenn bestimmte Neuronen aktiviert werden, etwa beim Gehen, feuern auch benachbarte Neuronen, was zu unkontrollierten Bewegungen führt. Diese Synchronizität kann die Motorik so stark beeinträchtigen, dass manchen Patienten sogar das Gehen unmöglich wird.

Die Lösung

Die Forschung hat gezeigt, dass die Stimulation dieser Hirnareale mit einem bestimmten Muster die Neuronen „desynchronizitieren" kann, so dass sie wieder unabhängig voneinander arbeiten können, was die motorischen Fähigkeiten des Patienten erheblich verbessert. Manche Patienten entscheiden sich für eine Stimulation mittels invasiver Hirnimplantate, aber die oben erwähnte Studie zeigt, dass die Stimulation der sensiblen Fingerspitzen ähnliche positive Effekte erzielen kann. Wie in einem Bericht von NBC Today [3] berichtet wird, haben Sitzungen, die bis zu vier Stunden pro Tag dauern, zu einer deutlichen Verbesserung geführt.

Wie in einem Video über meinen Prototyp [4] zu sehen ist, geben die Handschuhe während der Behandlung zufällige Impulse über spezielle Pads (**Bild 1**) an den Fingerspitzen ab. Diese Impulse sind für jeden

Bild 1. Eines der Fingerpads.

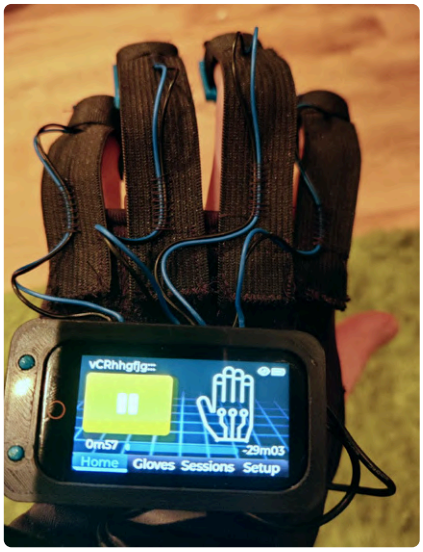


Bild 2. Die Touch-Oberfläche mit den beiden Hardware-Tasten auf der linken Seite.

Finger zufällig, mit einem zufälligen Impuls-Jitter, erfolgen aber bei beiden Händen gleichzeitig: Beide Hände und die entsprechenden Finger erhalten das gleiche, synchronisierte Zufallsmuster.

Mein Entwurf

Die in der Forschung verwendete Hardware erforderte ein sperriges externes Steuergerät mit Schultergurten und langen Kabeln zu den Händen, was die Lebensqualität des Patienten ziemlich beeinträchtigte, wie im NBC-Video deutlich wurde. Die Handschuhe, die ich entwickelt habe, bieten diesbezüglich erhebliche Vorteile:

- Sie sind kabellos. Am Handgelenk befestigte Batterien zur Energieversorgung können mindestens vier Tage lang genutzt werden, bevor sie über USB-C aufgeladen werden müssen.
- Ein Touchscreen auf dem Handrücken (**Bild 2**) erlaubt die Steuerung aller Funktionen - Start/Stopp, Einstellungen und Nutzerdaten.
- Obwohl die Stimulation zufällig ist, wird die Synchronität dadurch gewährleistet, dass die Impulse für beide Hände gespiegelt werden. Die Handschuhe werden über das drahtlose ESP-NOW-Protokoll und eine angepasste Version des NTP (Network Time Protocol) mit einem Fehler unter 320 µs synchronisiert.
- Sie unterstützen BLE (Bluetooth Low Energy), so dass die Benutzer-Einstellungen, der Batteriestand und die Sitzungen über eine Smartphone-App überwacht werden können.

Bei diesem Projekt kamen verschiedene Disziplinen zusammen: CAD, 3D-Druck, Schaltungs- und Platinenentwurf, eine ESP32-Platine und eine umfangreiche Firmwareentwicklung in C++- für den ESP inklusive Displaytreiber (und sogar die Integration des Home Assistant). Ursprüngliches Ziel war es, Handschuhe zu entwickeln, die mein Familienmitglied bei alltäglichen Aktivitäten wie beim Gassigehen mit dem Hund oder beim Kochen tragen kann, ohne lästige Kabel und einen lästigen Controller, damit sie ein „normaleres" Leben führen kann. Das Projekt steht auch im Einklang mit Ziel 3 der *Sustainable Development Goals* [5] - „Gute Gesundheit und Wohlbefinden".

Warnung: Konsultieren Sie immer einen Neurologen, bevor Sie ein solches Projekt in die Praxis umsetzen. Weder der Autor noch Elektor übernehmen irgendeine Haftung für Schäden oder Verletzungen, die sich aus der Verwendung dieses Entwurfs ergeben.

Bild 3. Mini-Vibrationsmotor 316040001 von Seeed Studio. (Quelle: Seeed Studio [6])

Innere Funktionsweise

Die Theorie hinter diesen Handschuhen ist, dass durch die Stimulierung der Fingerspitzen mit kleinen Vibrationen diese Reize über das Nervensystem das Gehirn erreichen und eine Desynchronizität der „klebrigen" Neuronen bewirken. Die Erzeugung von Vibrationen an den Fingerspitzen scheint trivial zu sein: Ich habe für jede Fingerspitze einen *Mini Vibration Motor* 316040001 von Seeed Studio verwendet (**Bild 3**) [6]. In diesen Motoren befindet sich ein kleines exzentrisches Gewicht, das sich dreht, wenn man eine Spannung anlegt, und so Vibrationen erzeugt. Ganz einfach!

Das Herzstück

Das Herzstück dieser Handschuhe bilden zwei T-Display-S3-Platinen von Lilygo [7], wie beim fertigen Prototyp in **Bild 4** zu sehen. Diese Boards bestehen aus einem schönen, hellen Vollfarb-TFT-Display mit einer Diagonalen von 1,9 Zoll und einer kapazitiven Touchoberfläche. Das Lilygo-Display wird von einem ESP32-S3 gesteuert, der viel Rechenleistung und Speicherplatz bietet - wir müssen nur auf die Stromaufnahme achten.
Natürlich verfügt der ESP32 über WLAN- und BLE-Konnektivität, so dass wir uns mit einem Smartphone oder per WLAN mit den Handschuhen verbinden können. Es gibt eine wirklich wichtige Verwendung für die WLAN-Schnittstelle, auf die ich später eingehen möchte.
Ein weiterer netter Aspekt des Lilygo-Boards ist der eingebaute LiPo-Akku-Lader. Da das Ziel des Entwurfs auch darin bestand, diese Handschuhe kabellos und mobil zu betreiben, müssen sie natürlich batteriebetrieben sein. Mit dem Ladegerät lassen sich LiPo-Akkus über den integrierten USB-C-Anschluss mit einem simplen USB-Ladegerät so einfach wie ein Smartphone mit frischer Energie versorgen.

Bild 4. Der fertige Prototyp: ein Paar VibroTactile-Handschuhe.

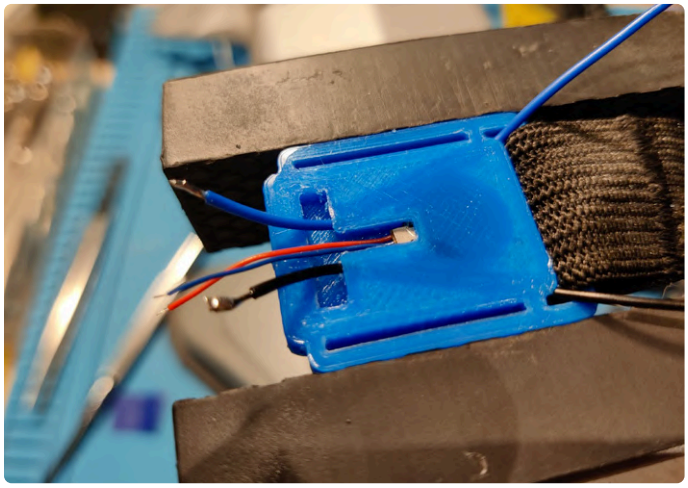


Bild 5. Das Innenleben eines Fingerpads.

Aufbau: die Fingerspitzen

Jetzt haben wir schon die Grundzutaten: Mikrocontroller, Touchscreen, USB-Lader, LiPo-Akkus, Vibrationsmotoren... Was kann da schon schiefgehen? Nun, Vieles.

Das fängt schon bei den Fingerspitzen an. In der ersten Entwurfsphase habe ich versucht, die Handschuhe so bequem wie möglich zu machen. Ich nahm ein paar handelsübliche Laufhandschuhe und fing an, mit meinen kleinen Motoren herumzutüfteln. Das Ziel war es, diese kleinen Motoren so an den Handschuhen zu befestigen, dass sie an jeder Fingerspitze genau an der gleichen Stelle sitzen bleiben. Ich schnitt einige Löcher in die Handschuhfinger, platzierte die Motoren und versuchte, sie festzunähen. Das funktionierte nicht - beim Anziehen der Handschuhe rutschte der Motor durch den Druck der Finger aus seiner Position und die dünnen Drähte brachen.

Der nächste Schritt: Heißkleber - natürlich braucht man Heißkleber! Zumindest dachte ich das. Ich klebte die Motoren auf ein Stück Klettband und wickelte es um die Finger. Das schien eine gute Lösung zu sein. Aber leider brachen die dünnen Drähte, die aus den Vibrationsmotoren herauskommen, immer noch durch. Jedes Mal, wenn wir diese Handschuhe ausprobierten, ging einer der Motoren kaputt. Der beste von ihnen hielt gerade einmal eine halbe Stunde. Und was nun? Müssen wir uns mit Motoren begnügen, die irgendwann von selbst kaputt gehen? Zurück zum Zeichenbrett. Ich brauchte eine Möglichkeit, diese zerbrechlichen dünnen Drähte zu schützen. So begann ich mit der Entwicklung von 3D-gedruckten Fingerpads und konnte damit im Grunde drei Probleme auf einmal lösen:

- Indem ich einen kleinen Hohlraum an der Fingerspitze angebracht habe, in dem der Motor bündig eingebettet sitzt, konnte der Tragekomfort deutlich erhöht werden.
- Die Motorkabel sind nun vollständig geschützt, da sie in einem Kanal innerhalb des Pads verlaufen (**Bild 5**) und mit den stärkeren flexiblen Kabeln verbunden sind. Innerhalb des Pads gibt es einen Hohlraum, in dem diese Drähte zusammengelötet werden und der später mit Klebstoff gefüllt wird. So ist der Motor - einschließlich der dünnen Drähte - vollständig in Klebstoff eingebettet, so dass er solide genug ist, als dass Vibrationen und Berührungen ihm etwas anhaben könnten.
- Um die Pelotte an die Fingerdicke des Patienten anzupassen, kann man nun Klettband verwenden, das um speziell entworfene „Griffe“ an der Pelotte gewickelt wird (auch in Bild 5 zu sehen). Dies sind gute Befestigungspunkte für die verschiedenen Teile des Handschuhs.

Aufbau: die Batterien

Die Handschuhe selbst sind einfache handelsübliche Laufhandschuhe. Sie sind nicht besonders dick und deshalb bequem zu tragen. Ich habe die Finger abgeschnitten und nur den Teil der Hand behalten (**Bild 6**). Da die Batterien irgendwo untergebracht werden müssen, habe ich mich dafür entschieden, den Controller auf dem Handrücken und die Batterie am Handgelenk anzubringen. So bleibt Platz für zwei parallel geschaltete LiPo-Zellen des Typs 18650, die nicht in einem „LiPo-Beutel“ versteckt, sondern in einem Batteriehalter untergebracht wurden. So kann man entladene Zellen durch frisch geladene ersetzen, wenn man die Handschuhe gerade einmal nicht aufladen kann. Der Batteriehalter ist in den Ärmel des Handschuhs „gefaltet“, um scharfe Kanten zu verstecken. Sie können auch eine einzelne 18650er-Zelle verwenden, was das Gewicht der Akkupacks halbiert und weniger sperrig wirkt.

Die gesamte Betriebsdauer der Handschuhe hängt von der Kapazität der Zellen ab. Bei je einer Zellen mit hoher Kapazität können die Handschuhe 16 Stunden ohne Unterbrechung betrieben werden, was bei vier Stunden pro Tag eine maximale Nutzungsdauer von vier

Bild 6. Sicht auf die Handfläche.

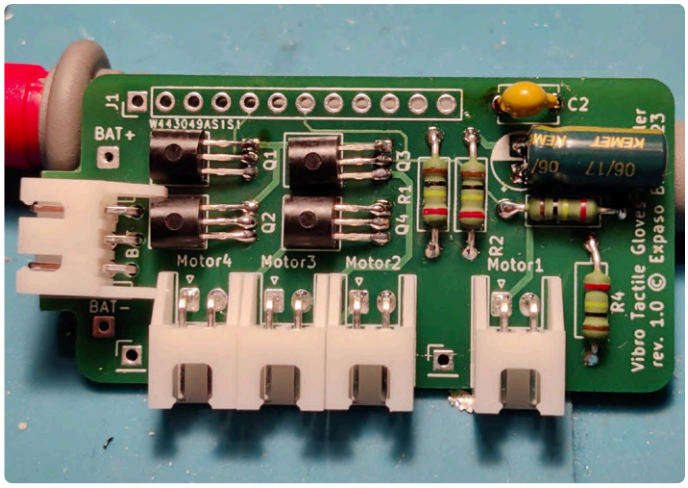


Bild 7. Die von mir entworfene und von PCBWay gefertigte Platine.

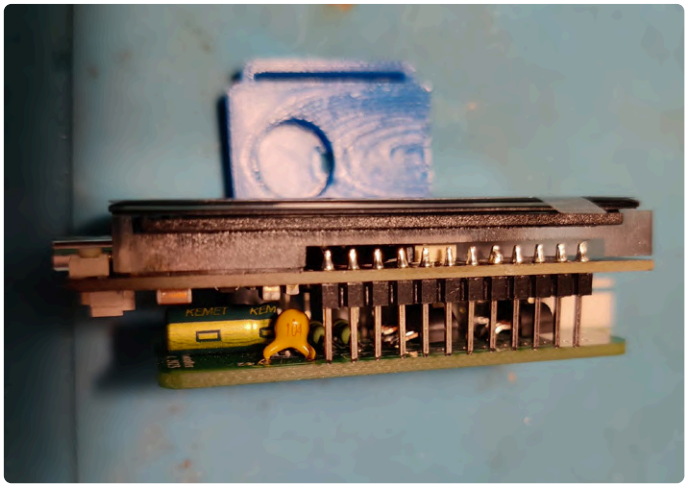


Bild 8. Sandwich aus meiner kundenspezifischen Platine und dem Lilygo-Touchscreen.

Tagen ergibt. Bei zwei dieser Zellen pro Handschuh verdoppelt sich die Zeitspanne auf etwa acht Tage.

Wenn Sie einen Blick auf die kundenspezifische Platine der Steuerung werfen (**Bild 7**), können Sie den JST-Batterieanschluss auf der linken Seite sehen. Wenn die Handschuhe für längere Zeit gelagert werden müssen, können Sie die Batterie einfach abklemmen und damit verhindern, dass die Elektronik die Batterien langsam entlädt, was der Laderegler des Lilygo-Moduls nicht verhindert. Ich empfehle zudem, geschützte Batterien zu verwenden. Eine Auswahl an Batterietypen finden Sie unter [8]. Da Sie diese Batterien nahe am Körper tragen, schützt der Batterieschutz auch Sie vor Überhitzung.

Aufbau: der Controller

Das T-Display-S3 mit Touchscreen bildet die Basis für dieses Projekt. Das Display beziehungsweise die ESP32-Platine besitzt zwei Header-Reihen an der Unterseite, für die ich eine passende kleine Aufsteck-Platine entworfen habe, die wenig Aufregendes, sondern nur JST-Anschlüsse für den Akku, die Motoren an den Fingerspitzen und einige Pufferstufen enthält.

Wenn Sie sich den Schaltplan in **Bild 9** ansehen, werden Sie die Kondensatoren C1 und C2 bemerken. Da die Motoren mit PWM angesteuert werden, erzeugen wir eine Menge Rauschen auf den Versorgungsleitungen, besonders wenn die Batterien schwach sind. C2 filtert höhere Frequenzen, während C1 die Einschaltströme glättet, wenn ein Motor aktiviert wird. Das sollte helfen, die Spannung am Controller selbst zu stabilisieren. Denn obwohl das T-Display-S3 einen kleinen Kondensator neben dem Controller hat, um seine Versorgung zu stabilisieren, ist es good practice, die Versorgung des Controllers zu entkoppeln.

Die Ausgangssignale zu den Motoren müssen gepuffert werden. Es wäre sehr schlecht, die Motoren direkt über die Ausgangspins des Prozessors mit Strom zu versorgen, wenn das angesichts des Stroms überhaupt möglich wäre, sondern einige externe MOSFETs als Puffer dazwischen schalten. Q1...Q4 sind 2N7000-MOSFETs, die eine eingebaute Body-Diode besitzen, die die von den Motoren ausgehende Gegen-EMK kurzschließt. Die Gegen-EMK wird erzeugt, wenn ein Motor von seiner Stromversorgung getrennt wird. Das bestehende Magnetfeld um die Spulen bricht plötzlich zusammen und erzeugt eine Spannung, die der Versorgungsspannung entgegengesetzt ist. Diese negative Spannung könnte den Mikrocontroller oder die MOSFETs (ohne diese Dioden) zerstören. Da die meisten Body-Dioden für diese Aufgabe nicht geeignet sind, wäre eine separate schnelle Schottky- als Freilaufdiode parallel zum Motor eine bessere Option, doch Messungen dieses Effekts zeigen glücklicherweise, dass in diesem speziellen Fall die Body-Dioden nicht überlastet werden.

Ein Pull-Down-Widerstand von 100 kΩ vom Gate zur Masse wurde hinzugefügt, um das Gate des MOSFETs auf Low zu legen und dafür zu sorgen, dass sich keine Motoren unerwartet von selbst aktivieren, wenn der Mikrocontroller sie nicht aktiv ansteuert. Dies ist keine Vorsichtsmaßnahme, sondern notwendig, da während des Hochfahrens des Controllers sich die meisten seiner Pins in einem hochohmigen Zustand befinden, so dass das Gate der MOSFETs schwebt und die Motoren zufällig aktiviert werden können.

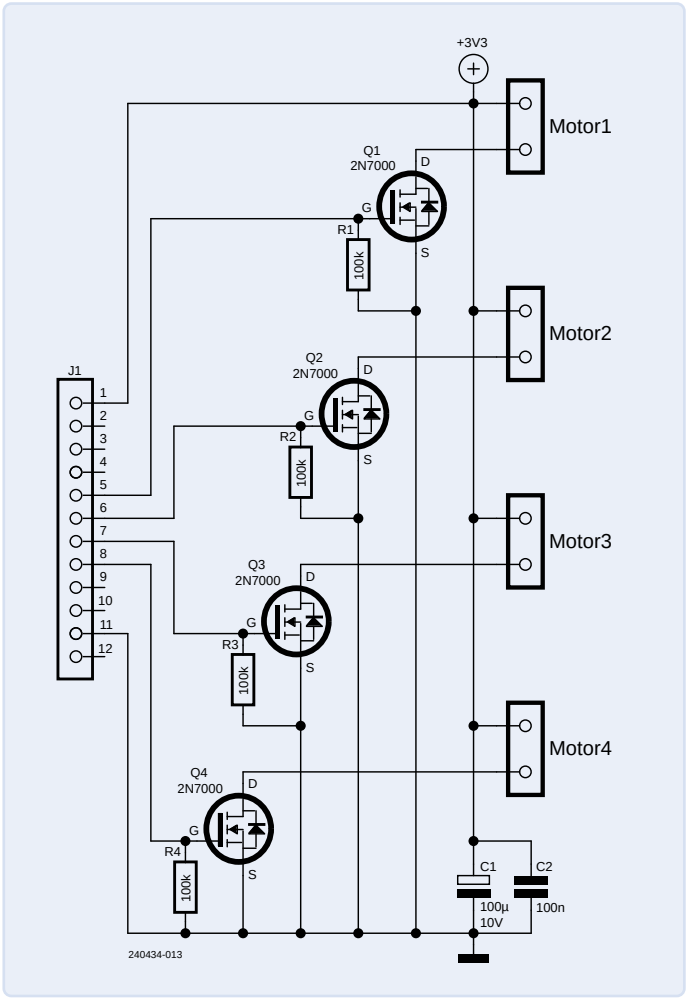


Bild 9. Die Kondensatoren C1 und C2 glätten die Motospannung.

Wenn die Handschuhe nicht aktiv benutzt werden, wird der Controller in einen stromsparenden Zustand versetzt. In diesem Zustand wird der größte Teil der Controller-Hardware deaktiviert, und auch die Ansteuerung der Pins wird unterbrochen. Mit einem einfachen Widerstand lässt sich ein fester AUS-Zustand herstellen, wenn keine Pins aktiv sind.
Der Wert von 100 kΩ erscheint recht hoch, wurde aber gewählt, um ein Gleichgewicht zwischen Batteriebeanspruchung und Pull-Down-Funktionalität zu erreichen. Denn wenn man einen Pull-Down-Widerstand hinzufügt, muss man „gegen ihn arbeiten", um das entsprechende Signal auf High zu setzen, was zu einer höheren Stromaufnahme führt.
Der Rest der Platine dient dazu, alle JST-Stecker an den richtigen Stellen zu platzieren. Ich hätte auch SMDs verwenden können, aber das hätte das Sandwich nicht dünner gemacht, wegen der Höhe, die die JST-Stecker erfordern. Also habe ich mich für Durchsteckbauteile entschieden, so dass das Bauen etwas mehr Spaß macht und die Platine etwas mehr „Körper" erhält. Auf der Elektor-Labs-Seite für dieses Projekt [9] gibt es Platinenlayouts zum Download, aber man darf sie auch selbst gestalten.
Ich habe einen Stapel von zehn dieser Platinen bei PCBWay bestellt. Alles ging glatt und sie sahen toll aus. Da wir hier Gleichstromlasten schalten, ist es eine gute Idee, die Drähte, die von der Steuerplatine zu den Motoren führen, zu verdrillen, um das von ihnen abgestrahlte Rauschen minimal zu halten. Um Probleme mit elektromagnetischen Störungen zu vermeiden, können zusätzlich einige kleine Ferritperlen aufgezogen werden.

Aufbau: die Software

Jetzt kommt die Krönung! Ich bin im Grunde meines Herzens Softwareentwickler, und als ich endlich zu diesem Teil kam, kam ich richtig in Fahrt! Das Hauptziel des Designs war: keine störenden Kabel. Das bedeutet, dass man von zwei Handschuhen mit gleicher Hardware auszugehen hat. Laut der Studie von Peter A. Tass wurde die Impulserzeugung wie folgt gehandhabt:

„Sequenzen von Vibrationsreizen (mit 250 Hz Vibrationsfrequenz und 100 ms Dauer) wurden mit einer Rate von 1,5 Hz abgegeben, was einem Zyklus von 667 ms entspricht (Tass, 2017; Syrkin-Nikolau et al., 2018; Pfeifer et al., 2021). Während einer Sequenz wurde jede Fingerkuppe der Finger eins bis vier genau einmal stimuliert, wobei beide Hände spiegelbildlich stimuliert wurden. Die Reihenfolge der Sequenzen wurde zufällig variiert. Die Intervalle zwischen den Stimuli waren konstant (bei regulärem vibrotaktilen koordinierten Reset, vCR) oder unterlagen einem moderaten Jitter (bei verrauschter vCR)"

Okay, also haben wir im Grunde Zyklen von 667 ms, in denen die vier Finger (der Daumen darf nicht mitspielen) eine Vibration von 100 ms Dauer erhält. Das lässt uns 667 ms - (4 × 100 ms) = 267 ms „Zwischenraum". Dieser Zwischenraum ist nicht gleichmäßig verteilt, sondern wird variiert, um ein Jitter zu erzeugen. Dieser Jitter wird dann zufällig auf jede Sequenz angewendet. Außerdem wird die Reihenfolge, in der die Finger aktiviert werden, ebenfalls zufällig für jede Sequenz gewählt, aber wie gesagt, für beide Händen perfekt gespiegelt. Zu allem Überfluss mussten wir auch noch PWM verwenden, um die Intensität der Vibrationen zu variieren.
Das ist an sich schon ein Problem. Es bedeutet, dass sich die Handschuhe sehr zufällig verhalten, aber beide müssen immer wissen, was sie tun. Und das ist ohne eine Form der Kommunikation zwischen den Handschuhen fast unmöglich.
Zunächst wollte ich die Handschuhe über Bluetooth Low Energy (BLE) mit einer Smartphone-App verbinden. Die App würde alle benötigten Sequenzen für eine Sitzung im Voraus generieren, sie an die Handschuhe senden und gleichzeitig die Wiedergabetaste auslösen. Das Problem dabei ist, dass es viel Speicherplatz benötigt, um Tausende von Sequenzen für eine vierstündige Sitzung zu speichern, und dass die Synchronisation aufgrund von Drift irgendwann verloren geht.
Deshalb habe ich mich schließlich für eine direkte Verbindung zwischen den Handschuhen entschieden. Nach Prüfung der Optionen (Bluetooth, Wi-Fi) entschied ich mich für ESP-NOW. ESP-NOW ist ein benutzerdefiniertes drahtloses Kommunikationsprotokoll von Espressif [10] und wird von den meisten ihrer Controllerboards unterstützt wird. Das Protokoll sieht aus wie Wi-Fi und verwendet die gleiche Hardware, ist aber viel einfacher und deterministisch. Noch besser ist, dass es keinen Access-Point benötigt, da die Kommunikation ausschließlich auf MAC-Adressen basiert.
Wenn die Handschuhe laufen, wird jede Sequenz, die sie auf den Motoren „spielen" müssen, im Voraus berechnet und auf direktem Weg und über den Funk an den anderen Handschuh weitergeleitet. Beide Handschuhe spielen die Sequenz ab, und während dieser Zeit berechnet der primäre Handschuh die nächste Sequenz und sendet sie zusammen mit einer genauen Startzeit an den sekundären Handschuh weiter.
Wenn die aktuelle Sequenz beendet ist, kennen beide Handschuhe also die nächste Sequenz und ihre genaue Startzeit. Beide Handschuhe warten nun auf diesen Zeitstempel und beginnen gleichzeitig mit der Wiedergabe der neuen Sequenz, während die nächste Sequenz berechnet wird. Auf diese Weise spielen die Handschuhe zufällige Sequenzen ab, spiegeln sich aber gegenseitig.
Der sekundäre Handschuh berechnet auch selbst neue Sequenzen, verwendet sie aber nur dann, wenn er die neue Sequenz vom primären Handschuh nicht rechtzeitig erhält. Das kann passieren, wenn die Kommunikation auf dem 2,4-GHz-Band durch gestört wird - ein echtes Problem, denn mit diesen Handschuhen können Sie in Ihrer Küche herumlaufen, wo die Mikrowelle und das Induktions-Kochfeld für erhebliche Interferenzen sorgt. Nach einer Unterbrechung sind beide Handschuhe aber innerhalb von 700 ms wieder synchronisiert.
Wie vergleichen die Handschuhe aber die Startzeit einer Sequenz mit einer zuverlässigen Zeitquelle? Ich habe erwogen, eine Echtzeituhr (RTC) oder einen Quarz an den Controller anzuschließen, um eine permanente Zeitquelle zu schaffen. Aber das würde die Anzahl der Bauteile erhöhen und räumlich nicht in diesen Entwurf passen (was sich jedoch durch den Einsatz von SMDs beheben ließe).
Stattdessen habe ich mich für einen Proxy entschieden: Die Handschuhe brauchen ja nicht die genaue Uhrzeit zu kennen, sondern müssen sich nur auf einen Zeitpunkt einigen, zum Beispiel die Anzahl der Mikrosekunden seit dem Einschalten. Dieser Wert wird jede Sekunde vom Primärhandschuh an den Sekundärhandschuh übermittelt, wobei auch die Round-Trip-Time (RTT) zwischen den Handschuhen gemessen wird. Der sekundäre Handschuh empfängt die Zeitnachricht und berücksichtigt die Hälfte der RTT, um seine eigene Uhr zu stellen.
Nach vielen Optimierungen und Anpassungen gewährleistet diese Methode (eine Variante des NTP-Protokolls), dass die internen Uhren der Handschuhe mit einem Fehler von höchstens 320 µs synchronisiert

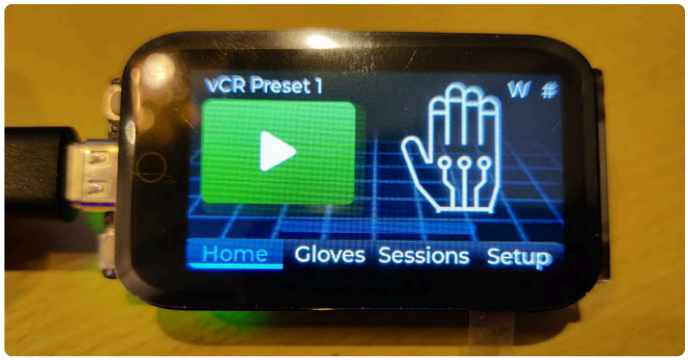


Bild 10. Die Benutzeroberfläche wurde mit SquareLine gestaltet.

werden! Das ist ein Fehler von weniger als einer Drittel Millisekunde, was für unser Ziel genau genug ist.
Die meisten Hindernisse sind jetzt aus dem Weg geräumt. Was noch übrig bleibt, ist die Benutzeroberfläche. Ich werde nicht näher auf die Tatsache eingehen, dass ich einen neuen Display-Treiber und einen neuen Touchscreen-Treiber schreiben musste, weil die vorhandene Dokumentation hier sehr dürftig war. Ja, es gibt Programmierbeispiele, aber die sind bestenfalls mittelmäßig oder verwenden veraltete Framework-Versionen.
Für die Benutzeroberfläche dachte ich, dass ich nach wochenlangem Low-Level-C++-Bit-Shifting und Byte-Zählen einen kleinen mentalen Urlaub verdient hätte. Ich wollte etwas Einfacheres, also entschied ich mich für LVGL (Light and Versatile Embedded Graphics Library) [11]. LVGL ist eine eingebettete Grafikbibliothek mit allem Schnickschnack, den man für die Erstellung von Touch-Benutzeroberflächen braucht. Um mir das Leben noch einfacher zu machen, habe ich mir den WYSIWYG-Editor *SquareLine Studio* [12] gegönnt, der auch den Code für die GUI generiert. In **Bild 10** sehen Sie meinen SquareLine-Entwurf in Arbeit.
Mit diesen Werkzeugen verlief die Erstellung der „Softwareanwendung" selbst eher wie die Erstellung von Desktop-Software. Man lässt den ganzen technischen Kram beiseite, erstellt User-Elemente für die Benutzeroberfläche und implementiert sie wie bei jeder anderen Anwendung auch. Das bedeutet, dass Sie verschiedene Menüs, Schaltflächen, Bildschirme und Einstellungen implementieren. Natürlich werden auch diese Einstellungen zwischen den Handschuhen über den zuvor mit ESP-NOW erstellten Kommunikationskanal synchronisiert. Bluetooth bleibt dabei Außen vor und Sie können die Handschuhe mit dem Smartphone verbinden! Ich habe mit der Basis-Applikation dafür begonnen, aber noch nicht viele Funktionen implementiert, da ich zu diesem Zeitpunkt nicht wusste, ob die Handschuhe überhaupt funktionieren. Ja, die Projekt-Vibes haben mich erwischt, ich weiß!

Aufbau: die Batterieversorgung

Dies war mein erstes Projekt, bei dem ich Batterien zur Stromversorgung des ESP32 verwendet habe. Der ESP32 kann, wenn er will, sehr stromhungrig sein, aber das musste ich ihm austreiben. Erstens wollte ich vermeiden, dass die Batterien entleert werden, wenn man die Handschuhe nicht benutzt. Ich brauchte also einen Tiefschlafmodus. Ich begann mit dem Offensichtlichen:

- Ausschalten der Hintergrundbeleuchtung
- Ausschalten des Display-Controllers
- Versetzen des Touchscreen-Chips in einen Low-Power-Modus
- Versetzen des Prozessors in den Ruhezustand

Als ich mir die Schaltpläne des Lilygo-Controllers ansah, entdeckte ich, dass der Hersteller bei der Optimierung der Schaltung für einen geringen Leckstrom wirklich sehr weit gegangen sind.
Es werden nicht viele Pull-Ups und Pull-Downs verwendet, und wenn doch, dann mit sehr großen Werten, beispielsweise 100 kΩ. Sogar die Schaltung zur Erkennung der Batteriespannung mit einem Widerstandssteiler ist oben mit einem I/O-Pin verbunden, so dass man den oberen Widerstand des Spannungsteilers „abklemmen" kann, um den Leckstrom durch diesen Widerstandsteiler zu minimieren. Ziemlich clever!
Mit dem ESP32 können Sie viele der sogenannten „Power-Domains" oder diskreten Hardwareteile des Chips abschalten. Dadurch wird die Stromaufnahme weiter reduziert. Der ESP32 verfügt sogar über einen speziellen Ultra-Low-Power-Coprozessor (ULP), mit dem man den normalen Prozessor komplett abschalten kann, einschließlich des Speichers und der gesamten Hardware, während er weiterhin auf Ereignisse an bestimmten I/O-Pins wartet.
Mit diesen Tricks habe ich die Tiefschlaf-Stromaufnahme auf nur 390 µA gesenkt. Das ist so wenig, dass es Jahre dauern würde, bis die Batterien entladen wären.
Trotz alledem reicht ein einfacher Druck auf einen der Knöpfe, um den Controller aufzuwecken und die Handschuhe zu starten - perfekt für unsere Bedürfnisse. Die Handschuhe überwachen ständig die Batteriespannung. Fällt sie unter einen bestimmten Schwellenwert, gelten die Batterien als erschöpft, und der Controller schaltet alles Mögliche ab: Der Akku muss über USB-C wieder aufgeladen werden.

Anwendung

Die Anwendung der Handschuhe ist ziemlich selbsterklärend. Ziehen Sie sie einfach an und drücken Sie entweder die große Wiedergabetaste auf der Benutzeroberfläche oder die obere Hardware-Taste (siehe Bild 2).
Sie können nach links oder rechts wischen, um die Elemente der Benutzeroberfläche zu durchlaufen, die Ihnen Informationen über die aktuelle Sitzung, die verbleibende Zeit, frühere Sitzungen, den Akkustand, die Konnektivität zwischen den Handschuhen sowie verschiedene Voreinstellungen und verwendare Einstellungen liefern.
Um die Batterie zu schonen, schaltet sich die Hintergrundbeleuchtung nach 30 Sekunden automatisch aus, auch wenn die Handschuhe in Betrieb sind. Ein einfaches Antippen des Bildschirms aktiviert die Hintergrundbeleuchtung wieder.
Nach Ablauf des Sitzungstimers schalten sich die Handschuhe je nach Voreinstellung automatisch ab. Außerdem fallen sie nach fünf Minuten Inaktivität automatisch in den Tiefschlaf. Sie können diesen Ruhezustand auch erzwingen, indem Sie die untere Hardware-Taste gedrückt halten. Um sie wieder aufzuwecken, drücken Sie einfach erneut die untere Hardwaretaste. Symbole auf dem Bildschirm zeigen den Batteriezustand an. Wenn der Controller erkennt, dass die Batteriespannung zu niedrig ist, schaltet er automatisch in den tiefstmöglichen Schlafmodus, um ein weiteres Entladen der Batterien zu verhindern.
Stecken Sie einfach ein beliebiges USB-C-Ladegerät an der Seite des Controllers ein. Der Handschuh hört automatisch auf zu laden, wenn die Batterie voll ist.
Während des Ladevorgangs sind die Handschuhe weiterhin einsatzbereit, sodass Sie sie beim Laden gleichzeitig zum Beispiel ein Buch lesen können. Dieser USB-C-Anschluss wird auch zum Hochladen neuer Firmware verwendet.

Ein Blick in die Zukunft

Alles in allem war es eine ziemlich lange Reise! Aber ich habe jede Etappe geliebt. Und die Tante? Nun, das Senden von zufälligen Signalen direkt an ein Gehirn ist nichts, was man auf die leichte Schulter nehmen sollte. Es wird ein paar Jahre dauern, bis bewiesen ist, dass diese Methode sicher ist. Da diese Handschuhe auf frühen Forschungsergebnissen beruhen, steht es mir nicht zu, zu behaupten, ob sie funktionieren oder nicht, oder ob sie tatsächlich sicher in der Anwendung sind. Sie verwenden diese Handschuhe daher auf eigene Gefahr, und ohne Konsultation des behandelnden Neurologen gar nicht!. Beginnen oder stoppen Sie niemals die Aufnahme irgendwelcher Medikamente oder andere Maßnahmen, ohne Ihren Arzt oder Neurologen zu befragen.

Aber immerhin habe ich eine Perspektive geschaffen. Hoffentlich wird es diese Handschuhe geben, wenn sich der Zustand meiner Tante verschlechtert. Es wäre großartig, wenn die Forschung von Peter A. Tass letztendlich die Lebensqualität vieler Parkinson-Patienten verbessern würde.
Ich bin dankbar, dass ich einen kleinen Beitrag leisten konnte, um meiner Verwandten zu helfen, bei der Parkinson diagnostiziert wurde. Wenigstens konnte ich etwas tun, anstatt hilflos zuzusehen, wie eine schreckliche Krankheit ihr Unwesen treibt.

SE – 240434-02

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Wenden Sie sich bitte an den Autor unter hans@expaso.nl oder an die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de

Über den Autor

Hans van Essen interessierte sich seit seinem fünften Lebensjahr für Elektronik, angeregt durch die „Lektionen" seines Großvaters über Elektronenröhren, Transistoren und frühe integrierte Schaltkreise. In den späten 1980er Jahren wandte er sich der Computertechnik und Softwareentwicklung zu und entwickelte ein tiefes Interesse an der digitalen Welt. Im Alter von 25 Jahren war Hans Mitbegründer eines erfolgreichen internationalen Softwareunternehmens, das sich auf Unternehmenslösungen für Logistik und Lagerverwaltung konzentrierte. Heute bietet er intelligente End-to-End-Lösungen an, die von Hardware bis zu skalierbarer Cloud-Software reichen, wobei er auf seine umfassende Erfahrung in beiden Bereichen zurückgreifen kann. Obwohl Hans von Beruf Softwareentwickler ist, war die Elektronik schon immer sein größtes Hobby und er sucht ständig nach Möglichkeiten, diese beiden Leidenschaften zu vereinen, indem er Hardware und Software zu innovativen, integrierten Lösungen verbindet.

Passendes Produkt

> **Lilygo T-Display-S3 ESP32-S3 Entwicklungsboard**
www.elektor.de/20299

WEBLINKS

[1] Elektor Labs gibt die Gewinner des Projektwettbewerbs 2024 bekannt: https://t1p.de/0jll1
[2] Vibrotactile coordinated reset stimulation for the treatment of Parkinson's disease: https://ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8771098
[3] NBC Today, „Scientists Develop Glove That Eliminates Parkinson's Tremor" (YouTube): https://youtu.be/YEEwbxFT4Bc&t=79s
[4] VibroTactile Handschuhe, mein Video: https://youtu.be/RJwAdNKXpX8
[5] Vereinte Nationen - Nachhaltige Entwicklung: Die 17 Ziele: https://sdgs.un.org/goals
[6] Mini-Vibrationsmotor 2,0 mm von Seeed Studio: https://tinyurl.com/seedminivib
[7] T-Display-S3 von Lilygo: https://www.lilygo.cc/products/t-display-s3
[8] Typen von 18650-Batterien: https://nkon.nl/blog/protectedunprotectedbattery
[9] Firmware und Layout-Dateien auf der Elektor-Labs: https://elektormagazine.de/labs/vibrotactile-gloves-against-parkinsons-disease
[10] ESP-NOW: Ein drahtloses Kommunikationsprotokoll für schnelle Antworten und stromsparende Steuerung (engl.): https://espressif.com/en/solutions/low-power-solutions/esp-now
[11] LVGL - Leichte und vielseitige Grafikbibliothek: https://lvgl.io
[12] Squareline Studio: https://squareline.io
[13] Synchronizität (Wikipedia): https://de.wikipedia.org/wiki/Synchronizit%C3%A4t

PCBWay

PCBWay — Ihr vertrauenswürdiger Partner für Flex- und Rigid-Flex-Leiterplatten

Flexible, langlebige und zuverlässige PCB-Lösungen

Egal, ob Sie flexible Leiterplatten für komplexe 3D-Layouts oder Rigid-Flex-Leiterplatten benötigen, um die Vorteile von starren und flexiblen Leiterplatten zu kombinieren – PCBWay bietet Ihnen hochwertige maßgeschneiderte Dienstleistungen.

Hohe Präzision | Vielseitiges Design | Reliable Quality

Start from Only **$46.74**

Treffen Sie uns auf der electronica 2024!

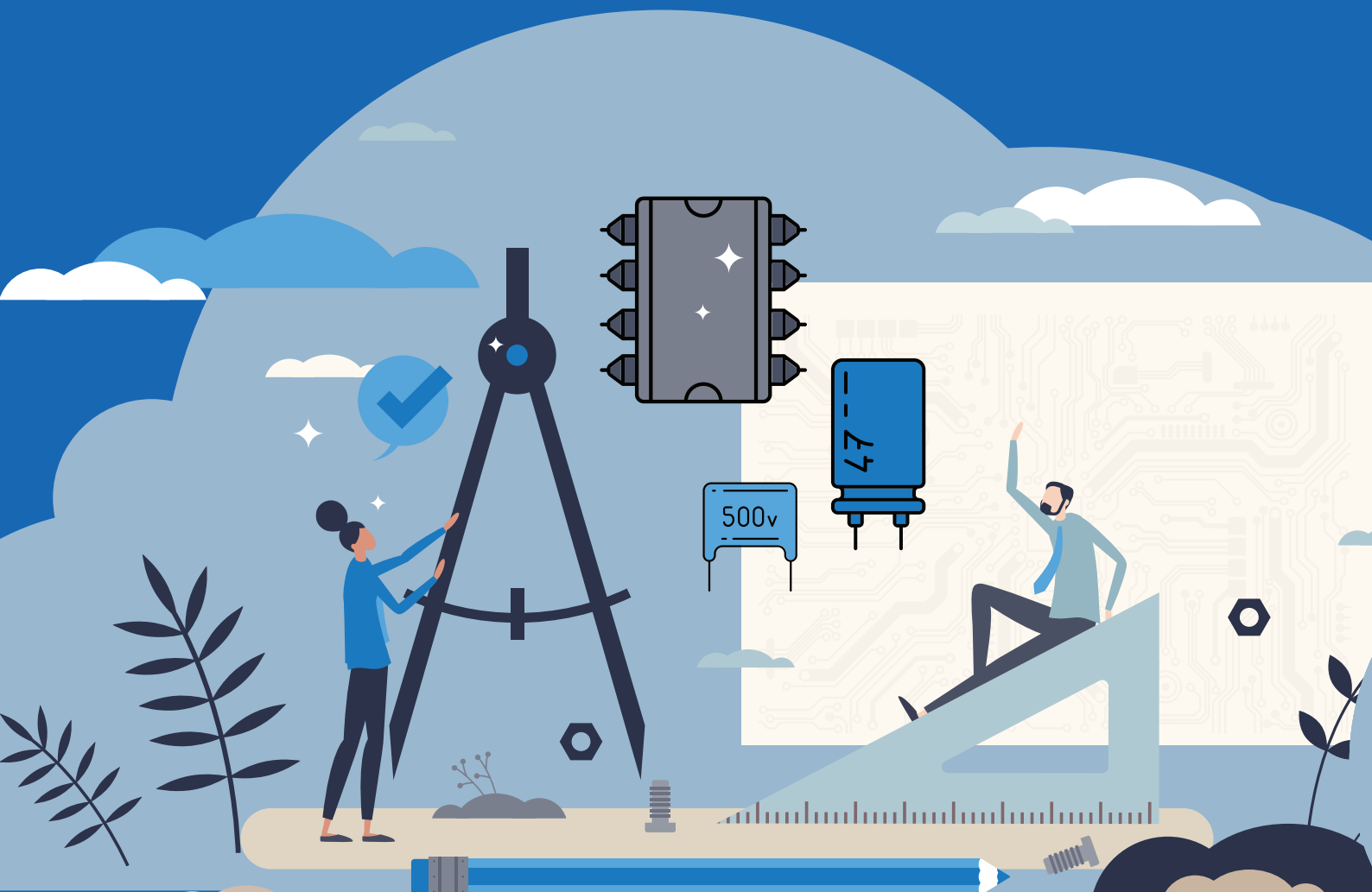
Besuchen Sie uns auf der **Standnummer *A1.163*** während der electronica, der weltweit führenden Fachmesse für die Elektronikindustrie. Sprechen Sie mit unseren Experten darüber, wie wir Ihnen die besten Flex- und Rigid-Flex-Leiterplattenlösungen für Ihr nächstes Projekt liefern können.

www.pcbway.com

service@pcbway.com

MOUSER ELECTRONICS

Wir unterstützen die Ingenieurinnen und Ingenieure von morgen

- Studienförderungen
- Bildungsrabatte
- Ingenieurtechnische Ausbildungsressourcen

mouser.com/educationalsales-emea