

REPARATUR ELEKTRONISCHER GERÄTE

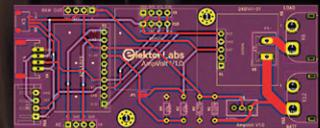
Werkzeuge, Techniken und Tipps

IM FOKUS

Messen und Testen

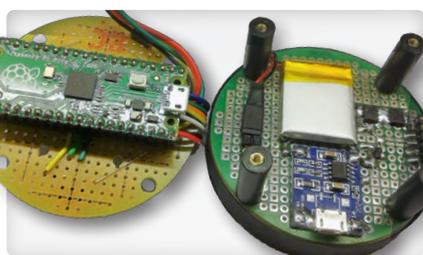
Modulares DC-Leistungsmessgerät AmpVolt

Platine zur Messung von Strömen bis 5 A und Spannungen bis 50 V



10-MHz-Referenzgenerator

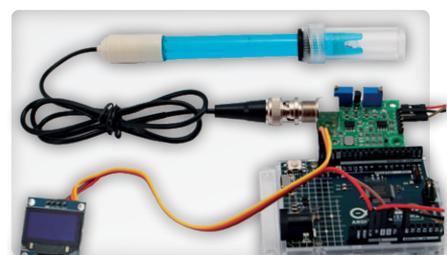
Hochgenau, mit Verteiler und galvanischer Trennung



Digitale Wasserwaage und aktive Stroboskop-Scheibe
Zur Feinabstimmung Ihres Plattenspielers



In-Circuit LC Meter
Eine Prototyp-Studie mit einem Arduino UNO



pH-Wert-Messung mit dem Arduino UNO R4
Überprüfen Sie die Qualität Ihres Wassers



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

Entwicklerboards eignen sich bestens, um im privaten Umfeld unterschiedliche elektronische Projekte mit überschaubarem Kostenaufwand durchzuführen. Ganz gleich, ob Multimedia-Center, Hausautomatisierung, Netzüberwachung oder andere IoT-Projekte realisiert werden sollen, eröffnen die Einplatinencomputer unzählige Möglichkeiten dank kompakter Konstruktion und Kompatibilität zu modernen Programmiersprachen.

NVIDIA Jetson Nano 1010 Bundle

Das NVIDIA® Jetson Nano Modul ist der ideale Einstieg in die Welt des Machine Learning und liefert durch seine neuronalen Netze bis zu 472 GFLOPS Rechenleistung.

- 4x 1,4 GHz, 4 GB RAM
- inkl. Gehäuse und Kühlung



Bestell-Nr.:
JETSON NANO 1010

229,⁵⁰

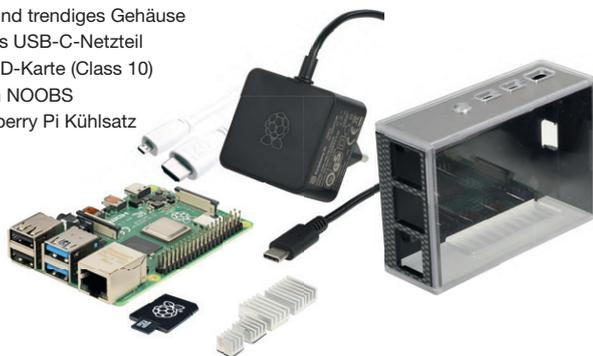


Das reichelt Raspberry Pi Bundle

Das Raspberry Pi 4 Bundle beinhaltet alles Nötige um sofort starten zu können. Setzen Sie Projekte wie HD-Mediaplayer, Internetradio, Webcam-Server, Hausautomatisierung um oder nutzen Sie es einfach zum allgemeinen Surfen im Internet!

Im Bundle enthalten sind:

- der Raspberry Pi 4 B 8 GB
- ein hochwertiges und trendiges Gehäuse
- ein leistungsstarkes USB-C-Netzteil
- eine 16 GB microSD-Karte (Class 10) mit vorinstalliertem NOOBS
- ein 4-teiliger Raspberry Pi Kühlsatz



Bestell-Nr.:
RPI 4B 8GB ALLIN

109,⁵⁰



reichelt
elektronik **MAGAZIN**

Themen-Special – Entwicklerboards für Ihr Projekt

Jetzt lesen ▶
<https://rch.it/MG797>



RASPBERRY PI, ARDUINO & CO:
**ENTWICKLERBOARDS
FÜR IHR PROJEKT**

Jetzt entdecken ▶
<https://rch.it/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. Versandkosten 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: 15. 4. 2024

55. Jahrgang, Nr. 601
Mai/Juni 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
Büra 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



Jens Nickel

Chefredakteur ElektorMag



Ganz klassisch

Der Schwerpunkt dieser Ausgabe lautet Messen und Testen, und wir wissen aus vielerlei Feedback, dass dies eines der beliebtesten Themenfelder unserer Leser ist. Das hat sicher mehrere Gründe. Zum einen werden hier ganz explizit die klassischen Elektroniker angesprochen (und ich sage „klassisch“ hier mit großem Respekt). Mess- und Testschaltungen sind sehr häufig weitgehend analog und mit vielen (diskreten) Bauteilen aufgebaut; es steckt viel Wissen bei der Auswahl der richtigen Komponenten und auch der eine oder andere clevere Schaltungstrick darin. Ein Wissen, dass in Zeiten immer schnelleren Prototypings nicht verloren gehen darf. Zum anderen haben die vorgestellten Projekte neben dem edukativen Zweck (und vielleicht einem gewissen Schaulusteffekt) auch einen praktischen Nutzen. Und zwar genau dort, wo sich Elektroniker am liebsten aufhalten: dem eigenen Labor. Das hat bei uns eine lange Tradition. 1978 veröffentlichte Elektor ein „Videoskop“, mit dem man einen Fernseher in ein Oszilloskop verwandeln konnte. Damals war das eine sensationelle Anwendung, denn man konnte mit dem Selbstbau unglaublich viel Geld sparen.

Den Bau eines Oszilloskops würden heute nur noch die wenigsten Leser in Erwägung ziehen. Doch unsere Autoren finden auch jetzt noch die eine oder andere „Marktlücke“ oder zumindest eine Anwendung, wo sich das Lötens tatsächlich auszahlt. Schauen Sie sich zum Beispiel einmal den 10-MHz-Referenzgenerator auf Seite 96 an, und es gibt noch mehr Beispiele in diesem Heft. Ganz besonders möchte ich Ihnen auch den Artikel meines Kollegen Jean-François Simon ans Herz legen, der bei einem Reparaturservice gearbeitet hat und daher aus der Praxis des Bauteil-Testens berichten kann (Seite 26).



Veröffentlichen Sie bei Elektor!

Ihr Fachwissen über Elektronik ist willkommen: Schicken Sie uns Ihr Video, Ihren Artikelvorschlag oder Ihre Idee für ein Buch! Wir haben unseren Leitfaden für Autoren und Content Creator aktualisiert. Alle Einzelheiten finden Sie unter:

www.elektormagazine.com/submissions



Elektor-Labs: Ideen und Projekte

Die Plattform Elektor Labs ist offen für jeden. Hier können Sie Ideen und Projekte zum Thema Elektronik veröffentlichen, technische Probleme diskutieren und mit anderen zusammenarbeiten.

www.elektormagazine.de/labs

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 Tristram 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



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



Reparatur elektronischer Geräte

Werkzeuge, Techniken und Tipps

Rubriken

- 3 Impressum**
- 6 STM32 Wireless Innovation Design Contest 2024**
Die Gewinner stehen fest
- 33 Aller Anfang ...**
muss nicht schwer sein: Wir setzen die Verstärkertheorie fort!
- 48 Bemerkenswerte Bauteile**
Zeile für Zeile: CRTCs
- 86 Aus dem Leben gegriffen**
Startrampe für Pangpong-Popöchen
- 92 2024: Eine Odyssee in die KI**
Wie man die Objekterkennung zum Laufen bringt
- 106 Projekt 2.0**
Korrekturen, Updates und Leserbriefe

Hintergrund

- 23 embedded world 2024**
Neue Produkte auf der Messe präsentiert
- 26 Reparatur von elektronischen Geräten**
Werkzeuge, Techniken und Tipps
- 40 Sparkplug im Überblick**
Eine Spezifikation für MQTT-Daten
- 69 Arduino-Messlabor**
Ein 8-in-1-Test- und Messgerät für das heimische Elektroniklabor
- 88 Digitales Speicheroszilloskop FNIRSI 1014D**
Gute Leistung für knappe Budgets
- 112 Der Raspberry Pi 5 und darüber hinaus**
Ein Interview mit Eben Upton, Geschäftsführer von Raspberry Pi

Industry

- 62 Open Source und seine Bedeutung für die Elektronikindustrie (2)**
- 66 M12-Rundsteckverbinder mit A-Kodierung**
Erste Wahl für industrielle Anwendungen



**Digitales Speicheroszilloskop
FNIRSI 1014D**
Gute Leistung für knappe Budgets

88

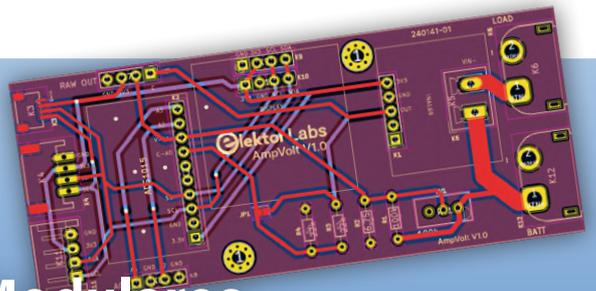
Radargesteuerte Beleuchtung

Automatisches Treppenhauslicht mit Anwesenheitsdetektion 50

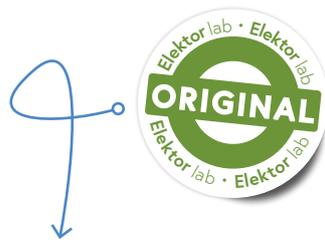


Modulares DC-Leistungsmessgerät AmpVolt

Teil 1: Platine zur Messung von Strömen bis 5 A und Spannungen bis 50 V 18



Projekte



- 8 In-Circuit LC-Meter**
Eine Prototyp-Studie
- 18 Modulares DC-Leistungsmessgerät AmpVolt**
Teil 1: Messung von Strömen bis 5 A und Spannungen bis 50 V
- 36 Ein einfacher DDS-Signalgenerator**
Direkte Digitale Synthese in ihrer reinsten Form
- 50 Radargesteuerte Beleuchtung**
Automatisches Treppenhauslicht mit Anwesenheitsdetektion
- 54 Digitale Wasserwaage und aktive Stroboskop-Scheibe für Plattenspieler**
Feinabstimmung Ihres Plattenspielers mit nur einem Gerät
- 74 Soundkarte als Betrag/Phase-Impedanz-Analysator**
Für Frequenzen von 100 Hz bis 90 kHz
- 80 pH-Wert-Messung mit dem Arduino UNO R4**
Überprüfen Sie die Qualität Ihres Wassers
- 96 10-MHz-Referenzgenerator**
Hochgenau, mit Verteiler und galvanischer Trennung
- 102 Projekt-Update #2: Energiemessgerät mit ESP32**
Einige Weiterentwicklungen

Vorschau

Elektor Juli/August 2024

Das nächste Heft ist wie immer randvoll gefüllt mit Schaltungsprojekten, Grundlagen sowie Tipps und Tricks für Elektroniker. Schwerpunkt wird das Thema **IoT und Sensoren** sein.

Besuchen Sie Elektors Webseite IoT und Sensoren, um zu mehr Inhalten zu gelangen: www.elektormagazine.de/iot-sensoren

- > Kleine DIY-Wärmebildkamera
- > Nebelkammer für Radioaktivität
- > Die besten Sensoren für Wetterstationen
- > Luftstrom-Detektor mit Arduino
- > GSM Alarm-Interface
- > Preiswerter I²C-Tester
- > Wasserleck-Detektor
- > AWS Cloud für Arduino und Co.



Elektor Juli/August 2024 erscheint am 10. Juli 2024.

Änderungen vorbehalten!



IM FOKUS

Messen und Testen



STM32 Wireless Innovation Design Contest

Die Gewinner stehen fest

Von Jean-François Simon (Elektor)

Nach mehreren spannenden Monaten des Wettbewerbs, in denen Dutzende von innovativen Projekten eingereicht wurden, hat der STM32 Wireless Innovation Design Contest nach einer intensiven Bewertungsphase seine drei Gewinner gekürt.



STM32 Wireless Innovation Design Contest

Sie möchten mehr über den STM32 Wireless Innovation Design Contest und alle daran beteiligten Projekte erfahren? Besuchen Sie dazu die Webseite des Wettbewerbs!

elektormagazine.com/st-contest



Nach mehreren spannenden Monaten des Wettbewerbs, in denen Dutzende von innovativen Projekten eingereicht wurden, hat der *STM32 Wireless Innovation Design Contest 2024* [1] (präsentiert von STMicroelectronics und Elektor) nach einer intensiven Bewertungsphase seine drei Gewinner gekürt. Herzlichen Glückwunsch an die folgenden Gewinner für ihre harte Arbeit: Cédric Jimenez (Erster Preis), Alain Romaszewski (Zweiter Preis) und Balthazar Deliers (Dritter Preis).

STM32-basierte Gewinnerprojekte

Nach eingehender Prüfung gab die Jury am 10. April 2024 die Gewinner am Stand von

STMicroelectronics [2] während der Messe embedded world 2024 bekannt. Die drei Gewinner wurden aus einer Vielzahl von herausragenden Beiträgen ermittelt, von denen jeder eine einzigartige Perspektive in den Bereich der Drahtlostechnologie einbringt (siehe **Bild 1**).

Den prestigeträchtigen ersten Preis (2500 €) erhielt Cédric Jimenez mit seinem **Open-Vario-Projekt** [3]: ein Open-Source-Multifunktions-Variometer für Gleitschirm- und Drachenfliegen, das mit Funktionen wie GNSS-Positionsbestimmung, Beschleunigungsmesser, Temperaturmessung, Berechnung der Gleitzeit und Flugdatenaufzeichnung ausgestattet

Bild 1. Von links nach rechts: CJ Abate (Elektor), Thibaut Dontail (4. Platz), Yvon Rannou (ST), Balthazar Deliers (3. Platz), Erik Jansen (Elektor), Cédric Jimenez (1. Platz), Roman Ludin (ST).





Bild 2. Das Open-Vario-Projekt



Bild 3. ZigBee-Umweltmesszentrum



Bild 4. Der Stromzähler, der zählt

ist und auf dem STM32WB5MM-DK Discovery Kit basiert (**Bild 2**). Die Jury war sehr beeindruckt vom Design und den Funktionen des Projekts sowie von der Detailgenauigkeit von Cédrics umfangreicher Dokumentation. Herzlichen Glückwunsch, Cédric, zu diesem wohlverdienten Sieg!

Alain Romaszewski gewinnt den zweiten Preis (1500 €) mit seinem **ZigBee-Umweltmesszentrum** [4] für Zimmerpflanzen oder Gewächshäuser, das das Kit STM32WB5MM-DK verwendet (**Bild 3**). Es verfügt über Sensoren zur Überwachung der Bodenfeuchtigkeit, der Temperatur, der Umgebungsbedingungen und des CO₂-Gehalts. Es umfasst automatische Bewässerungs- und Beleuchtungssysteme, die auf diesen Messungen basieren, mit Datenmanagement über einen MQTT-Server und eine Node-RED-Anwendung. Herzlichen Glückwunsch, Alain, für dieses sehr gut dokumentierte und gekonnt gestaltete Projekt, das zahlreiche externe Module verwendet und ein schickes 3D-gedrucktes Gehäuse besitzt.

Der dritte Preis (1000 €) ging an Balthazar Deliers für seinen **Electric Meter that Matters** [5], der einen intelligenten Stromzähler von

Linky mit einem Smart-Home-Ökosystem unter Verwendung des Matter-over-Thread-Protokolls integriert und so die Echtzeitüberwachung des Stromverbrauchs über ein Smartphone ermöglicht (**Bild 4**). Das Projekt umfasst maßgeschneiderte Hardware für die Datenkonvertierung und die Verbindung zum STM32WB5MM-DK Dev-Kit, Softwareentwicklung in C/C++ und Python sowie eine Smart-Home-Integration, die den Energieverbrauch visualisiert. All dies zeigt einen innovativen Ansatz für das Energiemanagement zu Hause. Gut gemacht!

STM32 Wireless Innovation and Inspiration

Der *STM32 Wireless Innovation Design Contest* bot Makern und Technologiebegeisterten eine Plattform, um ihrer Kreativität freien Lauf zu lassen und viele verschiedene Wege im Bereich der drahtlosen Anwendungen zu erkunden [6]. Von IoT [7] bis hin zur Hausautomatisierung hat der Wettbewerb gezeigt, auf welche vielfältige Weise die Drahtlostechnologie die Zukunft gestalten kann. Sind Sie inspiriert? Wenn Sie Ihre eigenen STM32-basierten Projekte entwickeln, möchten wir Sie ermutigen, Ihre Innovationen mit der weltweiten Elektronik-Community zu teilen.

Sie sind herzlich eingeladen, Ihre Projekte auf der Plattform Elektor Labs Online zu veröffentlichen: www.elektormagazine.de/labs. ◀

RG — 240241-02

STM32-Lösungen

Besuchen Sie die STMicroelectronics-Website (www.st.com), um zu weiteren Informationen über alle innovativen STM32-Lösungen des Unternehmens zu gelangen, einschließlich NUCLEO-WBA52CG, STM32WB5MM-DK und Nucleo-WL55JC.



WEBLINKS

- [1] 2024 STM32 Wireless Innovation Design Contest: <https://www.elektormagazine.com/st-contest>
- [2] STMicroelectronics: <https://www.st.com/>
- [3] Das Open-Vario-Projekt, auf Elektor Labs: <https://www.elektormagazine.de/labs/the-open-source-multifunction-variometer-for-paragliding>
- [4] ZigBee-Umweltmesszentrum, auf Elektor Labs: <https://www.elektormagazine.de/labs/zigbee-environmental-measurement-center-for-indoor-plants-or-greenhouse>
- [5] Der Stromzähler, der zählt, auf Elektor Labs: <https://www.elektormagazine.de/labs/the-electric-meter-that-matters>
- [6] Drahtlose Anwendungen: <https://www.elektormagazine.de/drahtlose-kommunikation>
- [7] IoT: <https://www.elektormagazine.de/iot-sensoren>

In-Circuit LC-Meter

Eine Prototyp-Studie

Von Michael Monkenbusch (Deutschland)

Bei der Fehlersuche auf einer Platine ist die Möglichkeit, passive Bauteile zu testen, ohne sie auszulöten, sehr nützlich, aber gleichzeitig auch kritisch, da Abhängigkeiten mit dem Rest der Schaltung während des Tests minimiert werden müssen. Dieser Prototyp einer Schaltung vermisst Kapazitäten von 1 pF bis 80 mF und Induktivitäten von 1 mH bis 40 H mit gutem Erfolg. Er verwendet eine Niederspannungsmethode, die robust gegenüber parasitären Parallel- oder Serienwiderständen ist. Die Signalverarbeitung erfolgt hauptsächlich analog; die Berechnungen zur Ausgabe von L, C und „parasitärem“ Widerstand werden von einem Arduino UNO durchgeführt.

Vor einiger Zeit habe ich mit einem Funktionsgenerator gespielt, um schnell einen Kondensator zu beurteilen, indem ich den Strom, der sich aus der angelegten Spannungswellenform ergibt, mit einem Oszilloskop gemessen habe. Der anfängliche Aufbau war primitiv, da ich einen kleinen Shunt-Widerstand in Reihe mit dem Kondensator verwendete, um auf den Strom zu schließen. Hier scheint eine Dreiecksspannung den Vorteil zu bieten, dass der Strom durch den Kondensator während der konstant ansteigenden und abfallenden Flanken der angelegten Wellenform im Idealfall einen konstanten (positiven oder negativen) Wert hat, der proportional zur Kapazität C ist (siehe Textkasten **Messverfahren**).

Ein zusätzlicher Strom $I_R(t) = U(t)/R_p$ aufgrund eines parallelen (Ableit-) Widerstandes R_p wäre proportional zur treibenden Dreiecksspannung $U(t)$. Wenn die treibende Spannung nun zwischen negativen und positiven Werten schwankt, wird sie während der konstant ansteigenden und abfallenden Flanken des Dreiecks zu einigen t_0 -Zeiten Null sein. Zu diesen Zeiten ist der parasitäre Widerstandsstrom $I_R(t_0) = 0$; die gemessene Spannung zu diesen Zeiten repräsentiert nur C und ist unabhängig von R_p . In der Praxis kann die Messung durch Abtastung des Stroms zu den Zeiten erfolgen, in denen $U(t) = 0$ ist. Es war, kurz gesagt, die anfängliche Idee, eine einfache C-Messschaltung zu bauen, die eine Spannung liefert, die proportional

zu C und unabhängig von Leckströmen oder anderen parallelen Widerständen ist.

Eine eingehendere Analyse der Schaltung zeigte, dass sie erweitert werden könnte, um Schätzungen des Wertes des Parallelwiderstandes R_p und auch die Bewertung eines möglichen Serienwiderstandes in einem Messdurchgang zu ermöglichen. Ersetzt man den Kondensator C durch eine Induktivität L, die Ansteuerspannung $U(t)$ durch einen Ansteuerstrom $I(t)$ und tauscht die Rollen von Parallel- und Serienwiderständen aus, so kann eine ähnliche Schaltung auch zur Messung von Induktivitäten verwendet werden. Die Strommessung wird durch eine Spannungsmessung über der Induktivität ersetzt (anstelle der Spannung über einem Strommess-Shunt im Kapazitätsmodus).

Diese Eigenschaften machen es verlockend, die Methode auch Bauteile in einer Schaltung zu verwenden, ohne sie auslöten zu müssen. Dazu muss man bedenken, dass im schlimmsten Fall alle Halbleiterbauteile - wenn sie nicht mit Strom versorgt werden - Diodenübergänge freilegen, was zu zusätzlichen parasitären Strompfaden führen kann. Bleibt die Betriebsspannung jedoch unter einigen 100 mV, sind die Diodenströme noch vernachlässigbar gering. Im Falle von Induktivitäten muss die resultierende Spannung unter dieser Grenze bleiben. Bei solch niedrigen Spannungen kann, ein nützlicher Nebeneffekt, auch die Polarität von Elektrolytkondensatoren vernachlässigt werden.

Im vorgestellten Prototyp des LC-Meters bleiben die Spannungen von Shunt und

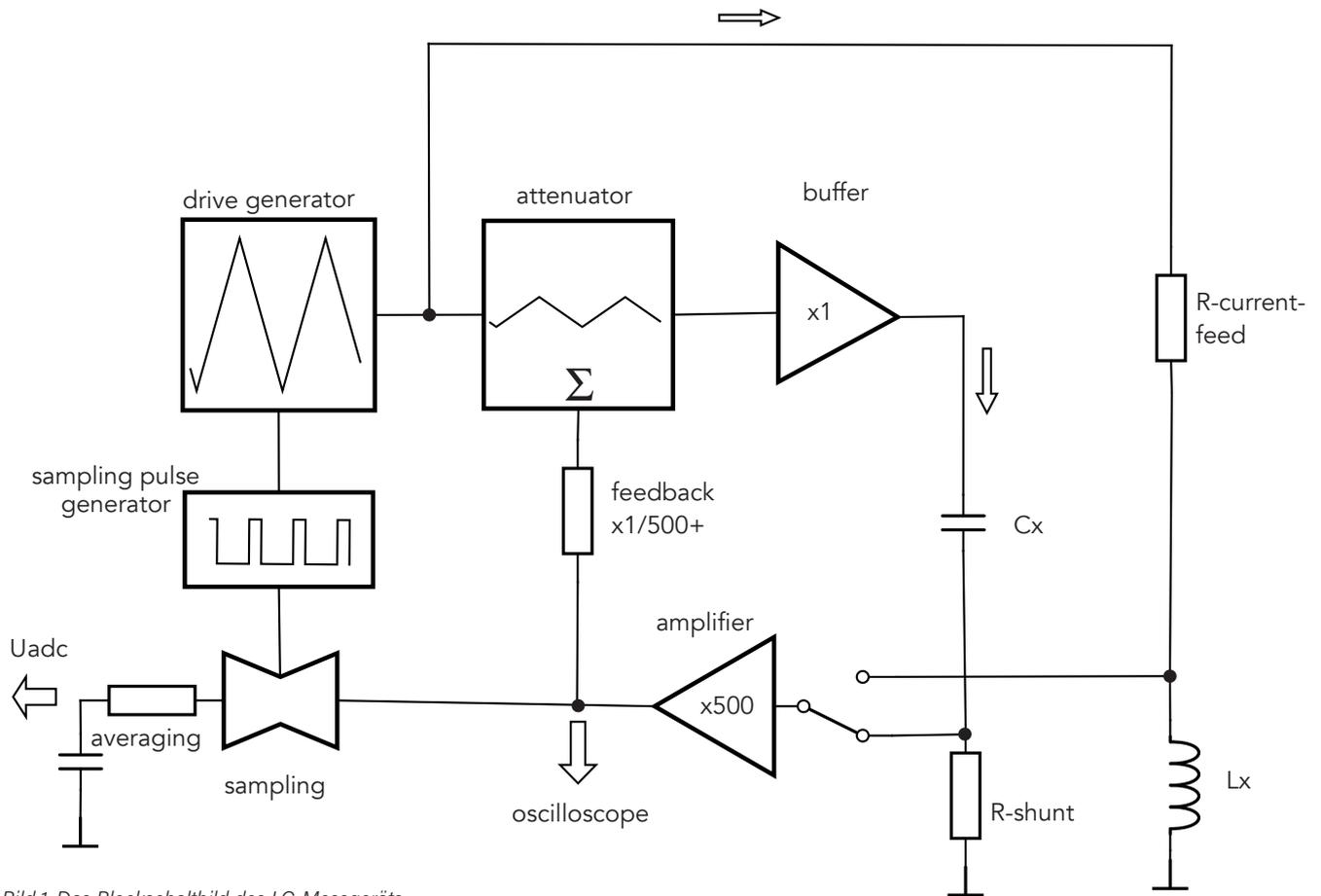


Bild 1. Das Blockschaltbild des LC-Messgeräts.

Induktivität unter 10 mV. Synchroner Abtastung und Mittelwertbildung machen die Messung zudem robust gegen Einflüsse von internen und externen Rauschquellen.

Schaltung in Blöcken

Das Blockschaltbild des LC-Meters ist in **Bild 1** zu sehen. Als Funktionselemente enthält die Schaltung einen Generator für eine definierte Dreiecksspannungsform, Komparatoren und die Logik zur Erzeugung der Abtastintervallimpulse, den Signalverstärker und die Abtaststufe(n) mit Pufferverstärkern (nicht dargestellt). Der Anschluss an den Arduino umfasst einen vierkanaligen 16-Bit-ADC ADS1115 von Texas Instruments.

Die analogen Eingänge Ax des Mikrocontrollers werden verwendet, um die Positionen von Bereichsschaltern zu bestimmen, und die digitalen Ausgänge adressieren eine Reihe von MOS-Schaltern, um ansatzweise ein Auto-Ranging zu unterstützen. Dabei kann der Arduino-Sketch die Messung auswerten und dann C- oder L-Werte und mögliche (effektive) parasitäre Widerstände mit einigen weiteren Hilfsinformationen auf einem 4×20-LCD anzeigen.

Schaltbild des LC-Meters

Der analoge Teil der Schaltung ist in **Bild 2** dargestellt. Er enthält die folgenden Gruppen:

- Referenzspannungen (U4, U11)
- Generator der Dreiecksspannung (U12A...D)
- Erzeugung von Abtastfenstern (U2A, U2B, U3A, U3B, U13A, U13B)
- Signalverstärker (U16A, U16B)
- Synchrone Polaritätsumkehr (Q8, U1B)
- Abtastung, Mittelwertbildung (U5B, U5C, U5D; C2, C3, C4; U5A) und Pufferung (U1C, U1D)

Die Dreiecksansteuerspannung wird durch Integration (U12A) erzeugt, das heißt durch Akkumulation eines Stroms in C1, der durch den über den Schalter SW2 mit der durch Q1, U12C polaritätsgeschalteten Referenzspannung verbundenen Widerstand eingestellt wird. U12B vergleicht den Dreieck-Ausgang mit dem Spannungshub des entsprechenden Operationsverstärkers ($\pm 2,5$ V), um die Polaritätsumschaltung (Q1) der hochpräzisen Spannungsreferenz zu veranlassen, die die wertbestimmende Steigung steuert.

U12D puffert die von R3 und R8 abgeschwächte Dreiecksspannung, um den Prüfling Cx mit niedriger Impedanz anzusteuern. Der induzierte Kondensatorstrom fließt durch den Shunt-Widerstand, der mit SW2 beziehungsweise über die für das Auto-Ranging verantwortliche MOSFET-Bank Q2...Q7 gewählt wird. Die resultierende Shunt-Spannung von einigen Millivolt wird durch U16A und U16B verstärkt (Gesamtfaktor etwa 500). Nach der ersten Verstärkerstufe wird das positive Rückkopplungssignal über R74 entnommen und in das Dämpfungsglied für die Steuerspannung (R3, R8) eingespeist, um die Steuerspannung so zu erhöhen, dass der Spannungsabfall über dem Shunt addiert wird. Das verstärkte Signal $IC_x(t)$ kann zur Überwachung durch ein Oszilloskop verwendet werden. In der Schaltung wird es durch eine synchrone Polaritätsumschaltung weiterverarbeitet, die von Q8 und U1B realisiert wird. Bei einem idealen Kondensator wäre der Ausgang von U1B dann eine Gleichspannung, die proportional zu seinem Kapazitätswert ist (siehe wieder Messverfahren). Nicht ideale Komponenten wie Parallelwiderstände und so weiter bewirken aber eine Steigung des Stroms durch R_{shunt}

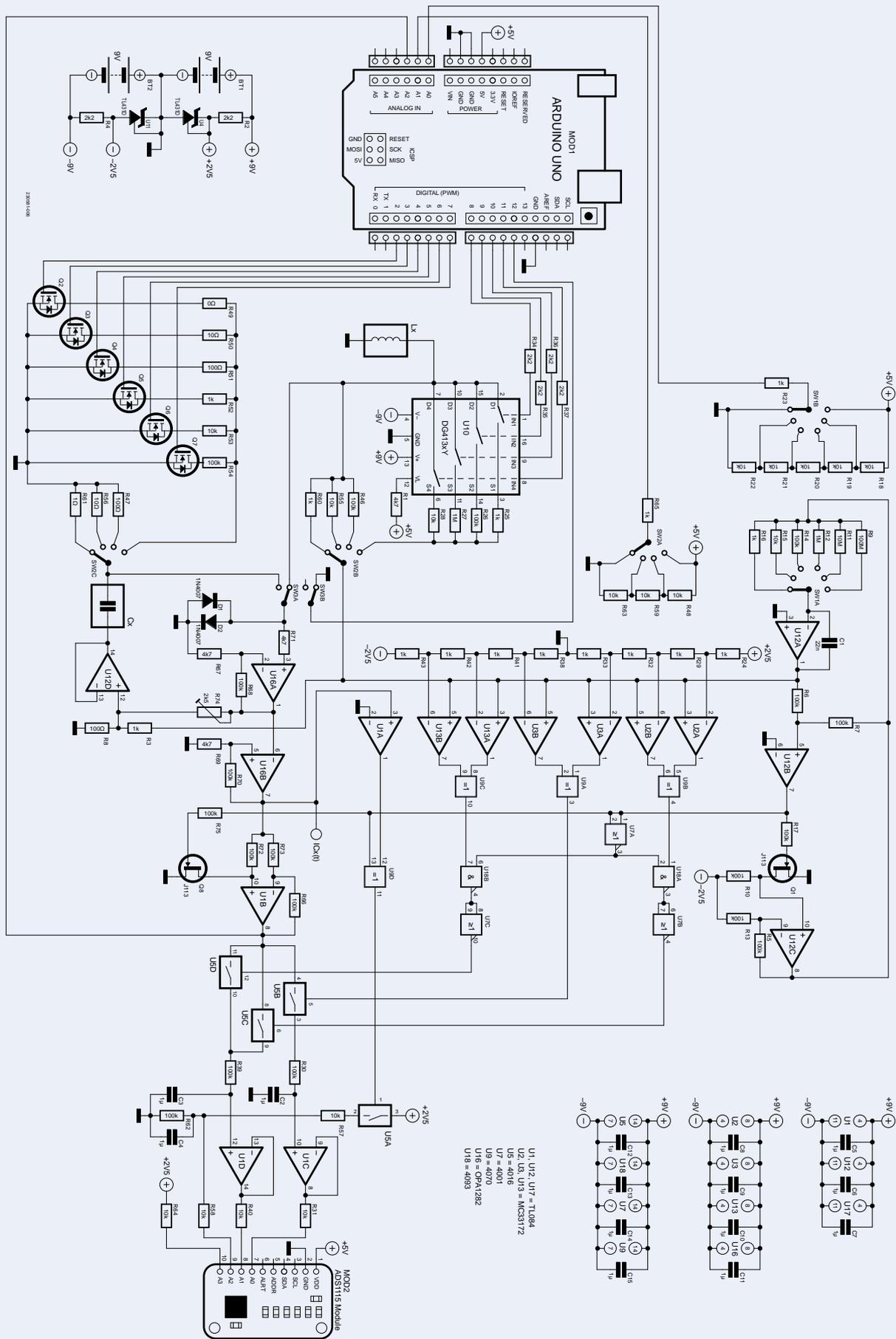


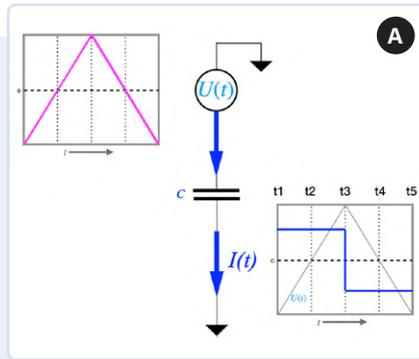
Bild 2. Schaltung des analogen Teils des Projekts.

Messverfahren

Die in einem Kondensator gespeicherte Ladung Q ist proportional zur Spannung U . Wenn man die Spannung $U(t)$ an einem Kondensator erhöht, erhöht sich die gespeicherte Ladung. Das bedeutet, dass ein Strom $I(t)$ fließen muss. Mathematisch wird dies durch $I(t) = C(dU/dt)$ ausgedrückt. Wenn U mit konstanter Steigung zunimmt, ist der Strom konstant. Ein Wechsel von steigender zu fallender Steigung bedeutet eine Änderung der Stromrichtung. Dies wird in **Beispiel A** dargestellt.

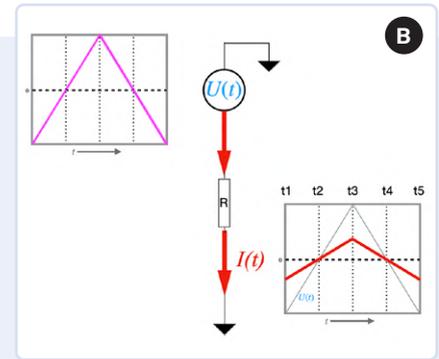
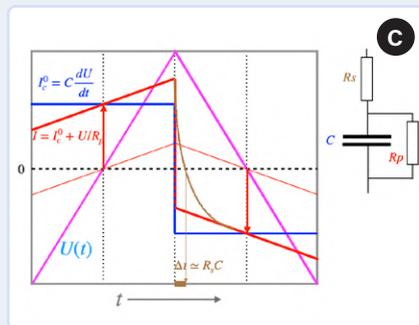
Bei einem Widerstand ist der Strom proportional zu U (**Beispiel B**), der Strom durch einen Widerstand parallel zu C addiert sich einfach zum Kondensatorstrom. Zu jedem Zeitpunkt t_0 mit $U(t_0) = 0$ überwiegt der kapazitive Strom. Die Abtastung zu diesen Zeitpunkten (und die Multiplikation mit dem Vorzeichen der Steigung) ergibt Stromwerte, die ausschließlich von C abhängen. Wenn der Strom $I(t)$ um t_0 herum linear ansteigt, kann das Abtastzeitintervall eine endliche symmetrische Ausdehnung vor und nach t_0 haben, was dazu beiträgt, die Beiträge der verschiedenen Rauschquellen zu mitteln.

Wenn nun noch ein Serienwiderstand R_s vorhanden ist, hat dies zur Folge, dass der Übergang von positiven zu negativen Stromwerten bei einer Änderung der Steigung von $U(t)$ nicht mehr abrupt erfolgt, sondern einer Transiente mit einer endlichen Zeitkonstante folgt. Diese Zeitkonstante ist $\tau_s = RC$, wobei R den Wert von $R_s \parallel R_p = R_s R_p / (R_s + R_p)$ repräsentiert, der für große R_p sehr nahe am Serienwiderstand R_s liegt.

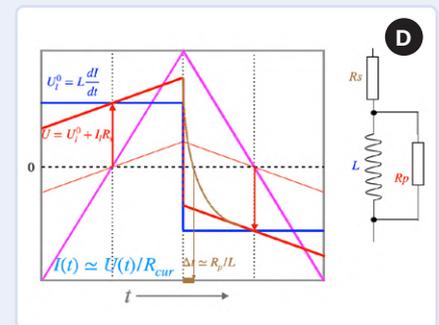


Nach einigen Zyklen von τ_s sind die Einschwingvorgänge abgeschlossen. Wenn das zentrale Abtastintervall an diesem Punkt beginnt, gibt es keinen verbleibenden Einfluss von R_s auf den abgeleiteten C -Wert. In der Schaltung in **Beispiel C** wird die Zeit $\Delta t \approx \tau_s$ durch Umwandlung der Zeitverzögerung zwischen dem Vorzeichenwechsel der Steigung und dem Nulldurchgang von $I(t)$ zu einer Spannung bestimmt. Es ist zu beachten, dass der für die Messung von $I(t)$ verwendete Shunt auch zum effektiven Serienwiderstand R_s beiträgt. Um dies zu kompensieren, wird die Rückkopplungskorrektur für $U(t)$ in die Schaltung aufgenommen (siehe **Rückkopplung**).

Um das Schema auf Induktivitäten L anstelle von Kondensatoren C anzuwenden, muss man die Rollen von



Strom und Spannung vertauschen. Wenn man eine Induktivität als Prüfling mit einem linear ansteigenden Strom $I(t)$ treibt, ergibt sich eine konstante induzierte Spannung $U(t)$ über der Induktivität $U = L(dI/dt)$. Die Wirkung des Parallelwiderstands im Falle von Kondensatoren ist hier nun die zusätzliche Spannung, die durch den (Reihen-) Widerstand der Spule verursacht wird, während jeder Parallelwiderstand zur Spule der Wirkung des Reihenwiderstands des Kondensators entspricht (siehe **Beispiel D**). Während bei „guten“ Kondensatoren der Parallelwiderstand in der Regel so groß ist, dass seine Wirkung praktisch unsichtbar ist, ist der Serienwiderstand von Induktivitäten fast immer deutlich als Steigung der gemessenen Spannung über der Induktivität sichtbar.



und damit eine Welligkeit des Ausgangssignals von U1B. Daher muss diese sägezahnartige Welligkeit in geeigneten Zeitfenstern abgetastet und gemittelt werden, um die richtigen und stabilen Werte für C und R_p zu ermitteln.

Die Zeitfenster für die Abtastung werden von der Logik (U7, U18) extrahiert, die durch Signale von Komparatoren (U2, U3, U13; im Prototyp habe ich Audio-Operationsverstärker MC33172 von STMicroelectronics verwendet) angesteuert wird. Diese Komparatoren erkennen die Übergänge der (ungedämpften) Ansteuerspannung bei den

vom Spannungsteiler zwischen R24 und R43 gelieferten Pegeln. Die XOR-Verknüpfung der nachfolgenden Übergänge ergibt ein logisches Signal, das high ist, wenn die Ansteuerspannung innerhalb des Fensters zwischen den zugehörigen Pegeln liegt.

So wird ein zentrales Fenster, symmetrisch zum Nulldurchgang der Steuerspannung, für die Hauptabtastung geschaffen, das den Wert von C ergibt und dem MOSFET-Schalter U5B zugeführt wird, der dann den Verstärkerausgang um den zentralen Teil der Steigung herum abtastet und in C2 mittelt. Weitere seitliche Abtastfenster

werden so ausgewählt, dass nur die „späten“ Fenster steigender oder fallender Flanken durch UND-Verknüpfung mit Sync1 oder NOT Sync1 ausgewählt werden. Durch Einspeisung in U5C beziehungsweise U5D wird das Spannungssignal des Verstärkers sowohl bei steigenden als auch bei fallenden Flanken ausgewählten seitlichen Fenstern in C3 gemittelt.

Der Mittelwert der Abtastung des Hauptsignals sowie der beiden seitlichen Perioden hat Zeitkonstanten, die durch $R_{30} \times C_2$ und $R_{39} \times C_3$ bestimmt werden. Diese Zeiten enthalten jedoch einen zusätzlichen Faktor

Rückkopplung

Im Kapazitätsmodus wird die Spannung des Shunt-Widerstands zur Ansteuerspannung $U(t)$ addiert, so dass die an den zu prüfenden Kondensator angelegte Nettospannung dem unverzerrten Dreieck in Form und Wert entspricht. Die Rückkopplung verwendet die gepufferte und verstärkte ($\times 20$) Shunt-Spannung und speist diese über R74 in den dämpfenden Spannungsteiler R3/R8 ein. Der Ausgang des Spannungsteilers wird von U12D gepuffert, um eine sehr niedrige Quellenimpedanz für die Ansteuerspannung zu erreichen. Der Rückkopplungswiderstand R74 muss so eingestellt werden, dass die Dämpfung durch R74/R8 der Verstärkung entspricht, um einen Rückkopplungsfaktor von ≈ 1 zu erhalten.

Bei größeren Faktoren wird die Schleife instabil. In der Praxis muss R74 mit einem hochwertigen Kondensator im Bereich zwischen 100...1.000 nF als Testkondensator auf einen Faktor nahe 1 abgestimmt werden. Die Rückkopplung dient dazu, den Einfluss des Shunt-Widerstands auf den Serienwiderstandseffekt zu eliminieren. Sie hat keinen Einfluss auf die Genauigkeit des aus der zentralen Abtastung abgeleiteten C-Wertes, solange die Dauer der durch R_s verursachten Transiente ausreichend kürzer als die Periode der Dreiecksansteuerung ist.

Für Induktivitätsmessungen wird keine Rückkopplung eingesetzt, da der vom Verstärker vorgegebene Bereich die nutzbare Spannung über der Induktivität auf < 10 mV am unteren Ende der Stromeinstellwiderstände R50, R55... begrenzt, was im Vergleich zu den 2,5 V am „heißen“ Ende steht. Der resultierende Stromfehler ist vernachlässigbar, wenn wir eine Genauigkeit von etwa 1 % anstreben.

$1/f$ – etwa 4 für die Hauptabtastung und 8 für die seitliche Abtastung –, wobei f der Bruchteil der Periode ist, während der das Abtastfenster offen ist. Die relativen Breiten der Abtastfenster (f) werden durch die Pegel der Spannungsteiler gesteuert, wie sie von der Reihe der Komparatoren (U2, U3, U13) gesehen werden. Um schließlich eine grobe Schätzung des Serienwiderstands zu erhalten, wird der Zeitpunkt des Nulldurchgangs (die Hälfte des Spannungssprungs bei der Flankenumkehr, wenn R_p unendlich ist) des Signals von U1A als Komparator erfasst und mit dem Sync1-Signal XOR-verknüpft (U9D). Dieses Signal ist idealerweise high im Zeitraum zwischen Vorzeichenumkehr („Null“) und dem Zeitpunkt, zu dem der (idealerweise plötzliche) Spannungssprung der verstärkten Shuntspannung die Hälfte ihrer Amplitude beträgt. Dieser Zeitraum bezieht sich auf die Zeitkonstante $\tau_s = R_{\text{series}} \cdot C$. Sie wird in eine Spannung umgewandelt, indem ein Schalter (U5A) während dieser Zeit zur Referenzspannung geöffnet und mit R57, C4 und R62 gemittelt wird. Daraus lassen sich die Zeitverzögerung und letztendlich der Serienwiderstand abschätzen.

Induktivitätsmodus

Mit SW3 kann zwischen Kapazitäts- und Induktivitätsmodus umgeschaltet werden. Im letzteren tritt die zu untersuchende Induktivität an die Stelle des Shunt-Widerstands im Kapazitätsmodus. Der angelegte Treiberstrom wird über Widerstände R60, R55 und R46 im Bereich von 1 k Ω bis 1 M Ω zugeführt, die von der nicht abgeschwächten Dreiecksspannung

gespeist werden. Da der Bereich des Spannungsabfalls über der Induktivität auf 10 mV begrenzt und damit viel kleiner ist als die 2,5-V-Ansteuerung, können wir dies ohne weitere Korrekturen als einigermaßen genaue Stromquelle betrachten.

Bereiche und Schalter

Sobald die Steilheit entweder manuell oder durch den Auto-Ranging-Algorithmus im Programm eingestellt ist, wird ein Shunt-Widerstand (oder Speisestrom-Widerstand) so gewählt, dass die resultierende Spannung idealerweise im Fenster zwischen 400...4000 mV liegt, um eine optimale Genauigkeit zu gewährleisten. Die Spannungen werden auch auf dem LCD angezeigt. Für das Auto-Ranging wird die Rohspannung am Ausgang der Synchronschalteinheit U1B direkt an den analogen Eingang A2 des Arduinos geführt, um eine Zeitverzögerung durch Mittelwertbildung zu vermeiden.

Die Shunt-Widerstände oder die Speisestromwiderstände werden manuell mit SW1 ausgewählt, wobei bei der Option Auto-Ranging die letzte Position die MOSFETs (Q2...Q7 für die Cx-Messung oder die geschalteten Widerstandsbänke U10 für Lx) einschließt.

Überlegungen zur Genauigkeit

Die Unsicherheiten der Werte des Integrationskondensators C1, der Integrationswiderstände R9, R11, R12, R14, R15 und R16 sowie der Shunt- oder Stromeinspeisungswiderstände wirken sich alle auf den Fehler der angezeigten Endwerte von C oder L aus. Außerdem müssen die Widerstände R5, R10

und R13 sowie R66, R72 und R73 in den Vorzeichenumkehrstufen genau denselben Wert haben. Auch das Dämpfungsglied R3, R8 sowie der Verstärkungsfaktor, der durch R67, R68 und R69, R70 bestimmt wird, haben Einfluss auf das Ergebnis.

Der Arduino-Sketch ermöglicht die Eingabe der exakten (gemessenen) Werte von C1, den Shunt- und Stromzuführungswiderständen sowie der Dämpfungs- und Verstärkungsfaktoren. Für den hier vorgestellten Prototyp habe ich diese Widerstände einzeln mit einem 6-stelligen Digitalmultimeter gemessen und ihre Werte in den Sketch eingegeben. Was die Widerstände betrifft, so wäre es eine praktikable Alternative, Typen mit 0,1 % Toleranz zu verwenden. Für C1 ist die Messung möglicherweise die einfachere Option. Auch hier gilt: Wenn die Werte von den Schaltplänen abweichen, geben Sie die richtigen Werte einfach im Sketch an! Um die Messgenauigkeit von C bei einem vergleichsweise kleinen Parallelwiderstand beziehungsweise von L bei einem großen Serienwiderstand aufrechtzuerhalten, kann es ratsam sein, die Genauigkeit, mit der das zentrale Abtastfenster symmetrisch zum Nulldurchgang von $U(t)$ ist, und eventuell die Länge des zentralen Abtastintervalls mit Hilfe der Widerstände des Spannungsteilers R33, R38 anzupassen.

Zusätzliche Bemerkungen

Die Wahl des MOSFETs BS170 als Schalter für den Shunt-Widerstand war darin begründet, dass ich diesen Typ sofort zur Verfügung hatte. Die Messung des Einschaltwiderstands ergab etwa 1,7 Ω , was im Sketch zu den Shunt-Werten addiert wurde. Dies ist bei den beiden niedrigsten Stufen (nominell 1 Ω und 10 Ω) etwas problematisch, so dass für den Test 1 Ω durch den MOSFET-On-Widerstand allein ersetzt wurde. Als Verbesserung sollten zumindest diese beiden niedrigsten Shunt-Werte zum Beispiel mit einem Si4136DY (0,0025 Ω bei 4,5 V) geschaltet werden. Die Backward-Body-Diode der niederohmigen Leistungs-MOSFETs kommt einem nicht in die Quere, da die maximal angelegte Spannung unter 0,2 V bleibt.

Das Schalten der Stromzuführungswiderstände für die Induktivität setzt die Schalter größeren Spannungen aus, aber mit einem vorgesehenen Mindestwert von 1 k Ω ist das Schalten mit den Einschaltwiderständen der DG411...13-Serie von 10...20 Ω kompatibel.

Bild 3. Schaltung des Ausgangs-Frontends des LC-Meters mit den abgeschirmten, 0,5 m langen Messleitungen.

Für die Abtastung und Mittelwertbildung sind die CD4016-Schalter trotz ihres Einschaltwiderstands von mehreren hundert Ohm bestens geeignet, und ihre Logikpegel sind zudem mit den Operationsverstärkern kompatibel.

Achtung! Die Widerstände R31, R40, R58 und R64, die den Ausgang der gemittelten Spannungspufferverstärker mit dem 16-Bit-ADC verbinden, sowie R1 an der digitalen Referenz des Schalters DG411...13 **dürfen nicht weggelassen werden**. Sie schützen die Chips vor einem zu hohen Eingangsstrom aufgrund von Spannungsunterschieden zwischen der 5-V-Schiene des Arduino und der ± 9 -V-Versorgung der Operationsverstärker.

Anschluss der DUTs

Da die Kapazität über den durch C fließenden Strom ermittelt wird, ist es möglich, den zu prüfenden Kondensator mit zwei abgeschirmten Kabeln zu verbinden: eines für die Steuerspannung und eines für den Verstärker/Shunt-Eingang. Die verbleibende parasitäre Kapazität beschränkt sich dann auf die nicht abgeschirmten Enden der Kabel (eine Länge von 0,5 m ist vollkommen ausreichend). Jegliche interne Streukapazität wird durch das Arduino-Programm subtrahiert. Die zu prüfenden kleinen Induktivitäten sollten mit sehr kurzen, verdrehten Drähten angeschlossen werden. Für Messungen an größeren Induktivitäten können abgeschirmte Kabel (die auch länger sein dürfen) von Vorteil sein, um den Eintrag von Rauschen zu verringern (Bild 3).

Beispiele

Zur Veranschaulichung der grundsätzlichen Funktionsweise der Schaltung als Kapazitätsmessgerät ist die Anzeige für einen 470-nF-Styroflex-Kondensator in Bild 4a und Bild 4b dargestellt. Die beiden Screens zeigen die Ergebnisse, die mit unterschiedlichen Steigungen der Steuerspannung $U(t)$ erzielt wurden. Die Steigung wird durch den Wert des gewählten Integratorwiderstandes RC in der untersten Displayzeile angezeigt, wo auch der (automatisch ermittelte) aktuelle Wert des Shunt-Widerstandes $R = R_{shunt}$ dargestellt.

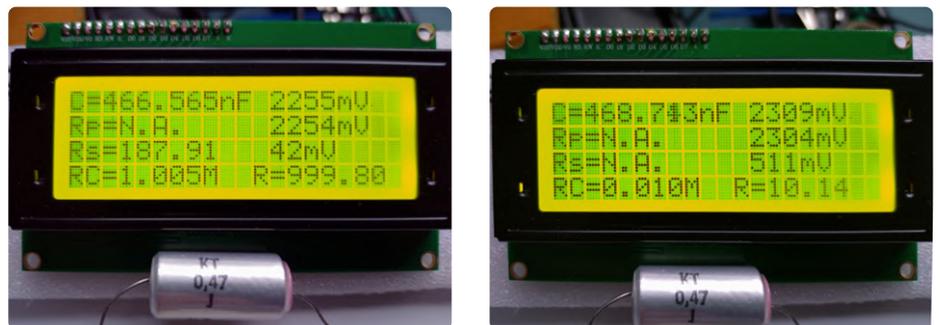
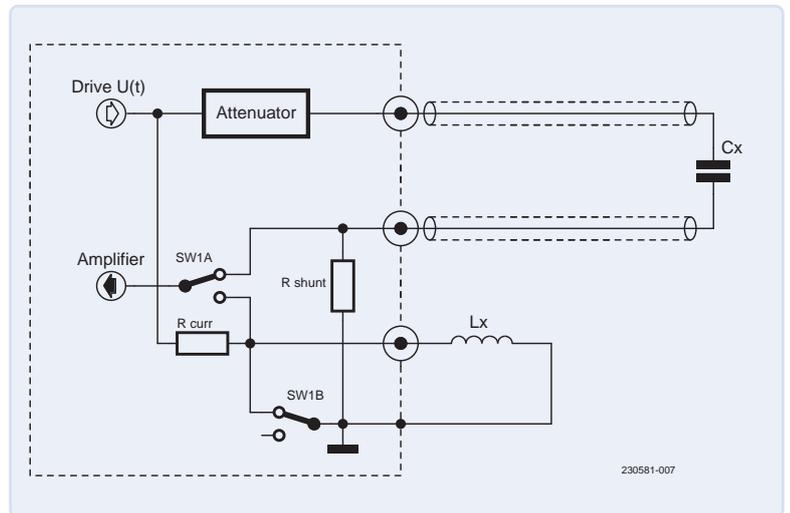


Bild 4. Anzeige bei verschiedenen Steigungen der Steuerspannung $U(t)$, mit den automatisch ermittelten Werten des Shuntwiderstands R, a) mit Schätzung eines Vorwiderstands $R_s = 187 \Omega$ (links) und b) ohne ihn (rechts).

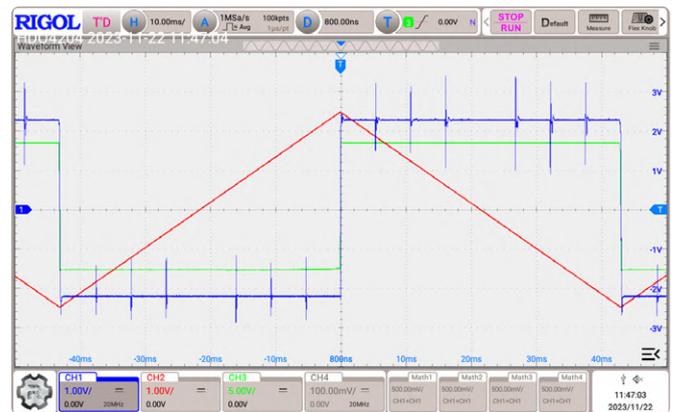


Bild 5. Die abgetastete Rohspannung.



Bild 6. Das Schaltungsprototypen des Autors in einer absolut prototypischen Version!

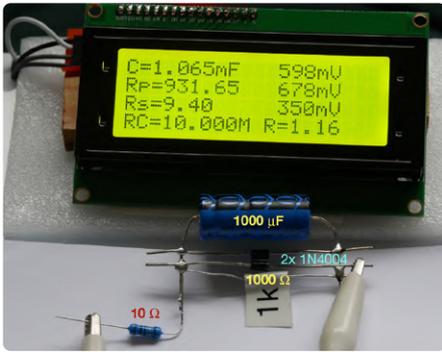


Bild 7. Anzeige mit einem Elektrolytkondensator von 1.000 µF parallel zu zwei antiparallel geschalteten Dioden und einem 1-kΩ-Widerstand, sowie einem vorgeschalteten 10-Ω-Serienwiderstand.

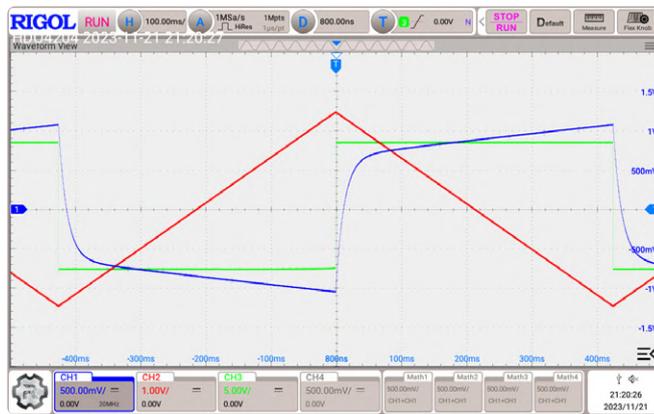


Bild 8. Die Rohspannungskurve (blau) zeigt den Sprungtransienten endlicher Zeit bei Flankenumkehr.

Das primäre Ergebnis C wird in der ersten Zeile zusammen mit der Rohspannung an A0 des ADS1115 angezeigt. Die zweite Zeile zeigt den geschätzten Wert R_p des Parallelwiderstandes und die zugehörige Spannung an A1 des ADS1115. Wenn R_p zu groß ist, um ermittelt zu werden, wird dies durch die Anzeige von „N.A.“ gekennzeichnet. Schließlich gibt die dritte Zeile einen

Schätzwert für den Serienwiderstand mit der Spannung an A3 des ADS1115 an. Der Spannungsbereich beträgt 0...4.096 mV, je größer der Wert innerhalb des Bereichsintervalls ist, desto besser ist die Auflösung/Genauigkeit. R_s ergibt sich aus der Differenz der Spannungen A0-A1, die für ein seitliches und ein zentrales Abtastintervall ermittelt werden. A3 ist eine (nicht lineare)

Umrechnung der Zeitverzögerung zwischen Neigungsänderung und Nulldurchgang des Dreiecksignals im Verhältnis zur Periode der Steuerspannung. Die abgetastete Rohspannung ist in **Bild 5** dargestellt. Die rote Kurve stellt $U(t)$ dar und die blaue Kurve die Spannung am Anschluss $IC_x(t)$. Abgesehen von den Spannungsspitzen entspricht sie dem idealen Verhalten des Kondensators.

Arduino-Sketch

Die Kommunikation mit dem Mikrocontroller umfasst ein ADC-Shield mit vier Kanälen und 16 Bit Auflösung in Form eines ADS1115 und die Ausgabe auf einem 4x20-LCD. Beide Komponenten sind über I²C verbunden. Weitere Hilfsspannungen werden direkt über die direkten Analogeingänge A0...A2 des Arduino gelesen, die zur Dekodierung von Bereichsschalterstellungen und zur Unterstützung der (Semi-) Auto-Ranging-Funktion verwendet werden. Weitere digitale GPIOs werden zur Ansteuerung der MOSFET-Schalter verwendet, die Shunt- oder Stromspeisewiderstände auswählen. Die tatsächlichen Werte der entsprechenden Widerstände sollten im Quellcode aktualisiert werden, um eine optimale Genauigkeit zu erreichen. Die Hauptfunktion des Mikrocontrollers besteht darin, die gemessenen ADC-Spannungen zu interpretieren und sie in die gewünschten Informationen über C/L, R_p und R_s umzuwandeln.

$$C_x = \frac{U_{\text{adc0}}}{U_{\text{ref}}} \cdot \frac{R_c \cdot C_1}{R_{\text{shunt}} \cdot A} - C_{\text{offset}}$$

und analog dazu

$$L_x = \frac{U_{\text{adc0}} \cdot R_c \cdot C_1}{\alpha \cdot U_{\text{ref}}} \cdot R_{\text{current-feed}}$$

wobei A der Faktor ist, der die auf die Ansteuerspannung angewandte Dämpfung $\approx 1/10$ mit der Verstärkung $\alpha \approx 500$ kombiniert, das heißt $A \approx 50$; für die tatsächlichen Werte siehe im Arduino-Sketch!

Als Parallelwiderstand (Serienwiderstand bei Induktivitäten) wird die Differenz der Spannungen aus dem „späten“ seitlichen

Abtastfenster U_{adc1} und dem zentralen Fenster U_{adc0} verwendet, U_{reffp} ist die Steuerspannungsdifferenz zwischen den Mittelpunkten der beiden Abtastfenster

$$R_p = \frac{U_{\text{ref}} \cdot f_p \cdot R_{\text{shunt}} \cdot A}{U_{\text{adc1}} - U_{\text{adc0}}}$$

jeweils für Induktivitäten

$$R_s = \frac{U_{\text{adc1}} - U_{\text{adc0}}}{\alpha \cdot U_{\text{ref}} \cdot f_p} \cdot R_{\text{current-feed}}$$

Die Analyse der Transiente, die Informationen über den Serienwiderstand von C oder den Parallelwiderstand von L (oder andere Verluste) enthält, ist aufwendiger. In einem ersten Schritt muss die Zeitverzögerung zwischen Steigungsänderung und Nulldurchgang des Signals τ_{ESR} aus dem Spannungsmesswert im dritten ADC-Kanal U_{adc2} abgeleitet werden:

$$\tau_{\text{ESR}} = 2 \cdot R_c \cdot C_1 \cdot \frac{R_{44} \cdot U_{\text{adc2}}}{R_{45} \cdot (U_{\text{ref}} - U_{\text{adc2}})} - \tau_{\text{offset}}$$

wobei τ_{offset} (einige µs) ein technischer Offset ist, der die Zeitverzögerungen bei der Nullpunktsermittlung korrigiert. Wenn der Parallelwiderstand von C vernachlässigt werden kann (also keine Steigung im Stromsignal), kann der Serienwiderstand leicht durch $R_s = \tau_{\text{ESR}} / (\ln(2)C_x)$ ermittelt werden. Im Falle eines erheblichen Effekts des Parallelwiderstands muss die zusätzliche Steigung berücksichtigt werden. Dadurch wird der Ausdruck etwas komplexer. Wenn die durch R_p bedingte Steigung den Nulldurchgang dominiert, ist eine zuverlässige Schätzung von R_s nicht möglich und die Anzeige zeigt N.A. Die tatsächlichen Ausdrücke sind im Quellcode des Arduino-Programms zu sehen.

Die sichtbaren Spitzen sind wahrscheinlich ein Nebeneffekt der Abtastimpulserzeugung mit der nicht wahrlich nicht idealen (man kann auch sagen, unordentlichen) Prototypverdrahtung (**Bild 6**). Hier veranschaulichen die Spitzen aber sehr schön die Lage der Abtastintervalle. Die große Lücke in der Mitte (circa 25 ms) ist das Hauptabtastfenster, die Markierungen um 38 ms zeigen das Abtastfenster an, in dem der Spannungsanstieg durch einen Parallelwiderstand gemessen wird.

Das zweite Beispiel simuliert einen großen 1.000- μ F-Elektrolytkondensator parallel zu zwei antiparallel geschalteten Dioden und einem 1-k Ω -Widerstand und einen 10- Ω -Vorwiderstand (**Bild 7**). Die große Kapazität erfordert die Wahl einer Flanke mit einer Periode von etwa 1 s ($RC = 10$ M Ω). Wie in **Bild 8** zu sehen ist, zeigt die Rohspannungskurve (blau) nun den zeitlich begrenzten Spannungssprung bei der Flankenumkehr sowie die geneigte ICx(t)-Spannung zu späteren Zeitpunkten, die auf das Vorhandensein des Parallelwiderstands hinweisen. Die angelegte Spannung ist zu gering, als dass die Dioden einen nennenswerten Strom leiten könnten; sie bleiben also „unsichtbar“. Diese Kurve zeigt auch, dass die abgeleiteten Werte für C und R_p im Extremfall beeinträchtigt werden können, wenn die durch R_s verursachte Transiente zu Zeiten stattfindet, zu denen das zentrale Abtastfenster beginnt.

Induktivitäten

Eine typische Kurve einer Induktivität ist in **Bild 9** dargestellt, die mit einem Ringkern mit 29 Windungen, $L = 3,45$ mH ($A_l \approx 4000$ nH/n²) erhalten wurde,

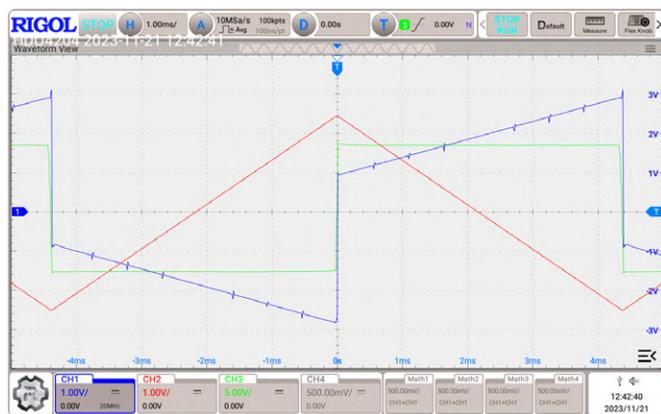


Bild 9. Typische Kurve einer Induktivität.

Stückliste

Widerstände: (alle 1%, Metallfilm, $\geq 1/8$ W)

R1, R71 = 4k7
 R2, R4, R34, R35, R36, R37 = 2k2
 R3 = 1k0 (1)
 R5, R6, R7, R10, R13, R66, R72, R73 = 100k0 (2)
 R8 = 100 Ω (1)
 R9 = 100M0 (3)
 R11 = 10M0 (3)
 R12, R27 = 1M0 (3)
 R14, R26, R46, R54, R62 = 100k0 (3)
 R15, R28, R53, R55, R57 = 10k0 (3)
 R16, R25, R52, R60 = 1k0 (3)
 R17, R30, R39, R75 = 100k0
 R18, R19, R20, R21, R22, R31, R40, R48, R58, R59, R63, R64 = 10k0
 R23, R45, R65 = 1k0
 R24, R29, R32, R33, R38, R41, R42, R43 = 1k0 (2)
 R44 = 1M0
 R47, R51 = 100 Ω (3)
 R49 = 0 Ω (3)
 R50, R56 10 Ω (3)
 R61 = 1 Ω (3)
 R67, R69 = 4k7 (1)
 R68, R70 = 100k0 (1)
 R74 = 5 k, Trimpoti

Kondensatoren:

C1 = 22 n, niedriger Temperaturkoeffizient
 C2...C14 = 1 μ , Keramik, Multilayer

Halbleiter:

D1,D2 = 1N4007, Schutzdioden
 Q1, Q8 = J113, n-j FET-Schalter
 Q2, Q3, Q4...Q7 = BS170, MOSFET-Schalter
 Q2,Q3 = Si4136DY, MOSFET (4)
 U1, U12 = TL084, Vierfach-Opamp
 U2, U3, U13 = MC34072PG, Doppel-Opamp
 U2, U3, U13 = LM393B + 1k Kollektor-Widerstand, Doppelkomparator (5)
 U16 = OPA2182, schneller Zero-Offset-Opamp
 U4, U11 = TL431D, 2,5V-Referenz
 U10 = DG413Y, Vierfach-MOSFET-Schalter (Stromantrieb)
 U5 = CD4016B, Vierfach-MOSFET-Schalter (Abtastung)
 U7 = CD4001B, Vierfach-NOR mit 2 Eingängen
 U9 = CD4070B, Vierfach-XOR mit 2 Eingängen
 U18 = CD4093B, Vierfach-NAND mit 2 Eingängen

Außerdem:

SW1 = Drehschalter, 6 \times 2
 SW2 = Drehschalter, 4 \times 3
 SW3 = Kippschalter, 2 \times 2

Anmerkungen:

- (1): Toleranzen bei diesen Bauteilen können durch die im Arduino-Programm eingegebenen Verstärkungs- und Dämpfungswerte ausgeglichen werden
- (2): Die Gleichheit der Werte zwischen diesen Widerständen beeinflusst die Genauigkeit
- (3): Diese Widerstände sind entscheidend für die Genauigkeit. Verwenden Sie Präzisionswiderstände mit geringer Toleranz
- (4): Genauere Alternative zu BS170, mit einem niedrigeren R_{ON}
- (5): Alternative zu MC33172.

während **Bild 10a** und **Bild 10b** die mit diesem LC-Meter beziehungsweise einem handelsüblichen Induktivitätsmessgerät erhaltenen Messergebnisse zeigen. Wie bei typischen Induktivitäten weisen die Kurven eine beträchtliche Steigung auf, die auf den Widerstand der Spule zurückzuführen ist. Das Verhältnis zwischen dem L-abhängigen konstanten Teil (Größe des Sprungs), der von der Änderungsrate dI/dt des Treiberstroms abhängt, und der widerstandsabhängigen Steigung (unabhängig von dI/dt) kann durch Wahl einer geeigneten Rate optimiert werden. Es gibt eine Reihe von Grenzen: einerseits eine zu kleine relative Sprungamplitude bei niedrigen Raten und andererseits zu lang anhaltende Störschwingungen nach dem Sprung (aufgrund von parasitären Kapazitäten) bei zu schnellen Raten (das heißt, zu kurze Zeit zwischen Sprung und Abtastfenster). Eine Sammlung von Anwendungsbeispielen für verschiedene Kondensatoren und Induktivitäten finden Sie auf YouTube [2].

Messstrategie und Überwachung

Die umfassenden und schnellsten Informationen über den Prüfling und die Relevanz der Ergebnisse erhält man, wenn das ICx(t)-Signal mit einem Oszilloskop überwacht wird. In diesem Fall wird es sofort offensichtlich, wenn die Gültigkeitsbedingungen verletzt werden,

so dass die Wahl des besten Steigungswertes einfach ist. Zusätzlich (oder ohne Signalüberwachung) zeigt die Konsistenz der Messwerte bei Änderung der Steigung (R_c) zuverlässige Werte an, und die Prüfung der ADC-Rohspannungen ermöglicht eine Bewertung der Genauigkeit. In jedem Fall sollte der von Transienten abgeleitete Serienwiderstand (ESR) nur als grober Schätzwert betrachtet werden.

Mögliche Modifikationen

- Um den Bereich des zulässigen Parallelwiderstands zu erweitern, sollte das zentrale Abtastfenster verkleinert werden (durch Verkleinern von R_{33} und R_{38}).
- Diese Verkleinerung des Abtastfensters kann eine Verringerung des Wertes von R_{30} erfordern, um den Wert $f \times R_{30}$ konstant zu halten.
- Die C/L- und R_p -Spannungen können auch über die analogen Arduino-Eingänge A2 und A3 gemessen werden, wenn eine geringere Genauigkeit akzeptiert wird.
- Die ± 250 mV von $U(t)$ können durch Reduzierung von R_8 weiter vermindert werden, um Fehler bei R_p vollständig zu vermeiden (wenn Schottky-Dioden vorhanden sind). Der tatsächliche Dämpfungsfaktor muss im Arduino-Programm geändert werden.

Der analoge Teil kann auch so gestaltet werden, dass nur die 5-V-Versorgung (des Arduino) benötigt wird. Dies impliziert die Verwendung geeigneter Operationsverstärker (zum Beispiel OPAx388s für alle Opamps), Rail-Splitting zur Schaffung einer virtuellen Masse (etwa mit einem TLE2426). Für die automatische Bereichsumschaltung des Induktionsstromwiderstandes muss dann jedoch ein geeigneter Ersatz für DG411...13 gefunden werden. ◀

RG — 230581-02



Über den Autor

Michael Monkenbusch ist pensionierter Physiker, der in den Bereichen Neutronenstreuung, Instrumentierung und Physik der weichen Materie [3] gearbeitet hat. Die Wiederbelebung seines alten Hobbys Elektronik führte zu dem hier vorgestellten Projekt.

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Bitte wenden Sie sich an den Autor unter michael.monkenbusch@googlemail.com oder an die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.

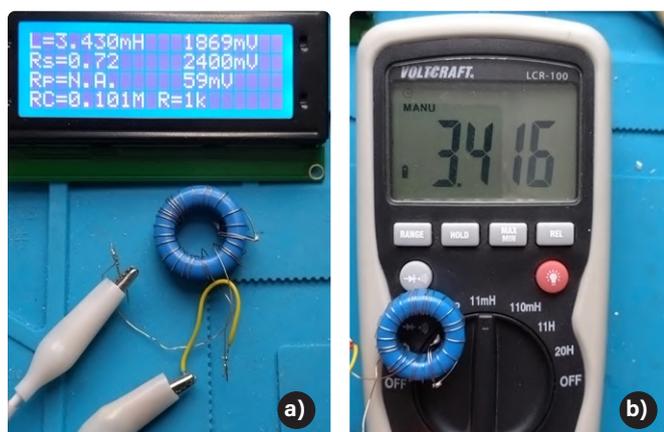


Bild 10. Messungen mit a) dem hier vorgestellten LC-Meter (links) und b) einem handelsüblichen Induktivitätsmessgerät (rechts).



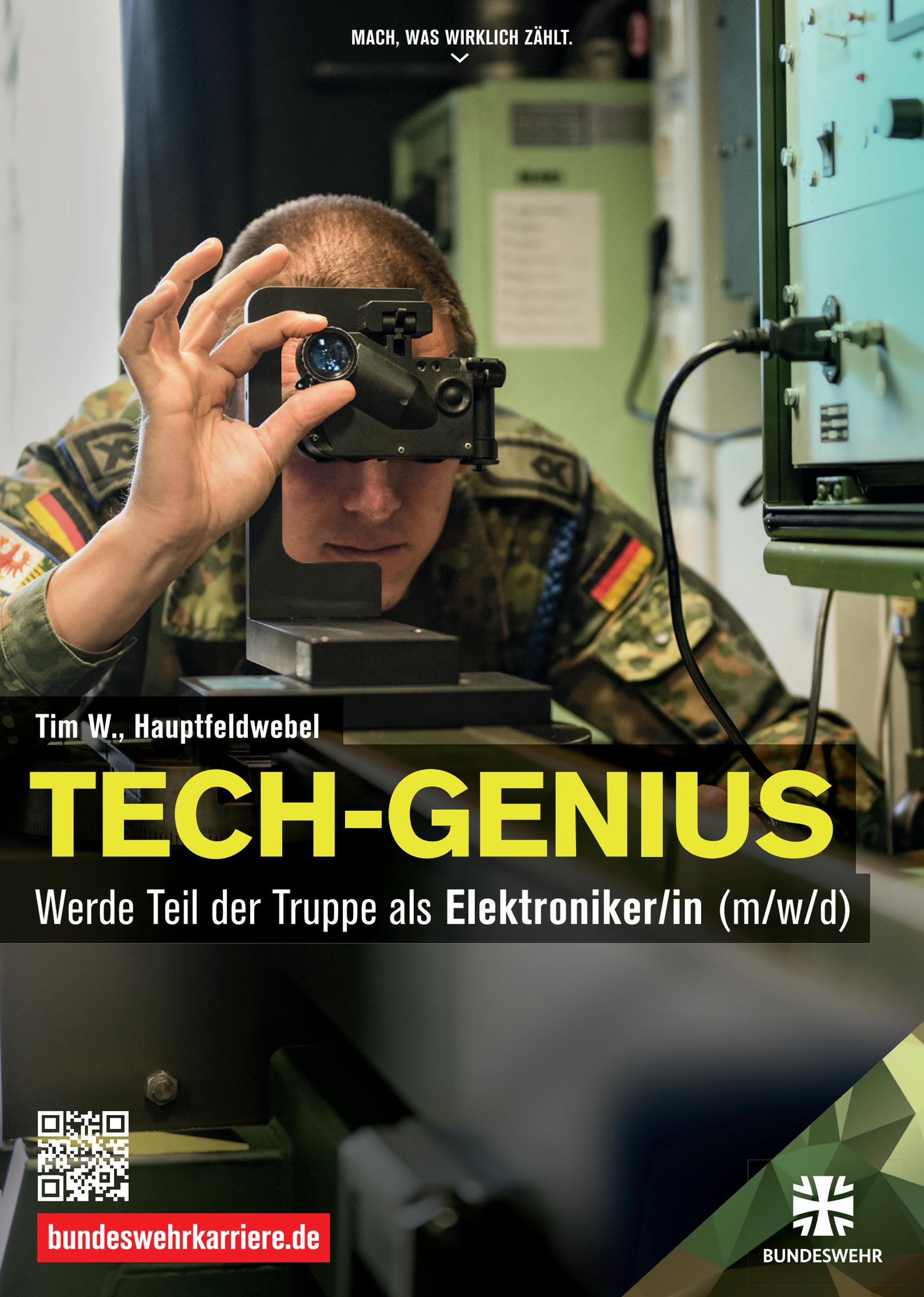
Passende Produkte

- **JYE Tech**
Kapazitätsmesser-Bausatz
www.elektor.de/17472
- **Peak Atlas LCR45 - LCR-Meter mit LCR-Impedanzmessung**
www.elektor.de/17563

WEBLINKS

- [1] Dateien zum Herunterladen: <https://elektormagazine.de/230581-02>
- [2] Dieses Projekt auf YouTube: <https://youtu.be/hfbUxPfHmeg>
- [3] Weiche Materie (Wikipedia): https://de.wikipedia.org/wiki/Weiche_Materie

MACH, WAS WIRKLICH ZÄHLT.



Tim W., Hauptfeldwebel

TECH-GENIUS

Werde Teil der Truppe als Elektroniker/in (m/w/d)



bundeswehrkarriere.de



BUNDESWEHR



Das modulare **DC-Leistungsmessgerät** AmpVolt

Teil 1: Platine zur Messung von Strömen bis 5 A und Spannungen bis 50 V

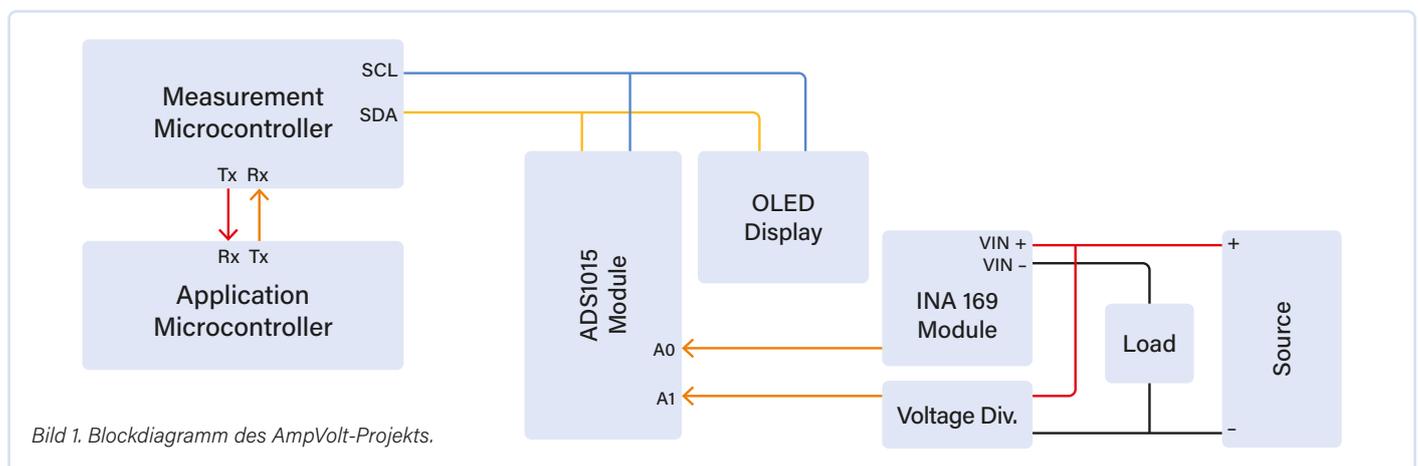
Von Saad Imtiaz (Elektor)

Für USB-Netzteile gibt es viele preiswerte Module zur sekundären Überwachung von Strom und Energie, aber auch zur primären Messung des Netzwechselstroms. Für Gleichspannungen über 12 V und erst recht über 24 V gibt es jedoch weniger Lösungen. Wenn man an kleine Solaranlagen und Elektrofahrräder denkt, wird dieser Spannungsbereich jedoch immer interessanter, und hier setzt dieses Projekt an. Beim vielseitigen, weil modularen Leistungsmessgerät AmpVolt dreht es sich in diesem ersten Artikel um die Messung von Spannungen bis 50 V und Strömen bis 5 A. Diese Messplatine kann an einen Mikrocontroller Ihrer Wahl angeschlossen werden.

Bei der Entwicklung des AmpVolt-Moduls war es mein Ziel, Präzision, Flexibilität und Modularität zu kombinieren. Unter diesem Gesichtspunkt wurden die Kernkomponenten, ein Präzisionsstromsensor INA169, ein Spannungsteiler und ein 12-Bit-ADC-Modul ADS1015 ausgewählt. Sie arbeiten zusammen, um genaue Strom- und Spannungsmessungen über einen weiten Bereich zu ermöglichen.

Das hier vorgestellte Modul kann an jede Art von Mikrocontroller mit einer Betriebsspannung von 3,3 V oder 5 V angeschlossen werden, der über eine I²C-Schnittstelle verfügt. Um das Modul noch vielseitiger zu machen, haben wir es mit einem OLED-Display ausgestattet, das über denselben I²C-Bus gesteuert wird. Für einen einfachen Anschluss Ihrer Wahl haben wir drei Steckverbinder für die I²C-Signale auf der Platine platziert: einen Grove- und einen Qwiic-Stecker im 2-mm-Raster und einen JST-XH-Stecker im 2,54-mm-Raster. Damit gängige Batteriesysteme bequem angeschlossen werden können, befinden sich auch massive XT60PW-Steckverbinder für die Last und die Quelle auf der Platine.

Bild 1 zeigt ein Blockdiagramm des gesamten AmpVolt-Projekts. Zu sehen sind das Messmodul sowie der/die angeschlossene(n) Mikrocontroller. INA169 und ADS1015 stammen von Texas Instruments [1][2]. Für dieses Projekt haben wir chinesische Breakout-Boards (BoB) für diese beiden Chips verwendet [3][4]. Es gibt aber auch andere BoBs mit dem ADS1015 mit identischen Pinout, die mit dem AmpVolt-Projekt kompatibel sind. Im Gegensatz zu den bekannten Hall-Effekt-Stromsensoren, die bei niedrigem Strom weniger genau sind als Shunt-Widerstände,



verwendet das INA169-Modul ein Shunt-Widerstands-Strommessverfahren. Diese Module sind kostengünstig und leicht erhältlich. Die Wahl des ADC-Moduls mit dem ADS1015 war ausschlaggebend. Seine 12-Bit-Präzision und die programmierbare Verstärkung ermöglichen hochpräzise Messungen. Dabei sollte man anmerken, dass nicht alle Mikrocontroller interne ADCs mit 12-Bit-Auflösung bieten und einige, zum Beispiel der ESP32 von Espressif, haben Probleme mit der Referenzspannung und mit der Linearität. Diese Inkonsistenz zwischen den MCUs unterstreicht die Notwendigkeit eines zuverlässigen externen ADCs. Daher wurde der ADC ADS1015 aufgrund seiner 12-Bit-Auflösung ausgewählt, der einen optimalen Kompromiss aus Genauigkeit, Geschwindigkeit und Energieeffizienz für eine Vielzahl von Anwendungen bietet. Obwohl ein 16-Bit-ADC wie der ADS1115 eine höhere Auflösung bietet, fiel die Entscheidung für den 12-Bit-ADC ADS1015, hauptsächlich aufgrund seiner höheren Abtastrate.

Der Schaltplan

Der Schaltplan in **Bild 2** zeigt die Verbindungen zwischen den beiden BoBs INA169 und ADS1015 an K1 beziehungsweise K2 mit den Verbindern, dem Spannungsteiler und dem OLED-Display. Da das INA169-Modul 1 V pro 1 A ausgibt, wird ein Spannungsteiler (R3 und R4) verwendet, um es mit 3,3-V-Systemen kompatibel zu machen. Wenn es jedoch stattdessen mit einem 5-V-Controller verwendet werden soll, kann der Lötjumper JP1 kurzgeschlossen werden, um den Spannungsteiler zu umgehen. Für die Spannungsmessung wird ein Spannungsteiler mit $R1 = 100 \text{ k}\Omega$ und $R2 = 6,7 \text{ k}\Omega$ verwendet. Mit diesem Aufbau können Spannungen bis zu 50 V gemessen werden, was für die meisten Gleichstromanwendungen mehr als ausreichend ist. Bei der Konnektivität hatte die einfache Integration des Moduls in verschiedene Systeme oberste Priorität. Daher verfügt es über einen Qwiic-Stecker (K3) für schnelles Plug-and-Play, einen Grove-Stecker (K4) für nahtlose Integration in das Ökosystem von Seeed Studio und einen 2,54-mm-Header für „kundenspezifische“ Konfigurationen. Die beiden XT60PW-Steckverbinder K6 und K12 für den Anschluss von Batterie und Last spiegelt die Benutzerfreundlichkeit und Zuverlässigkeit bei Hochleistungsanwendungen wider. Der Anschluss K7 ist für den Fall vorgesehen, dass der ADS1015 nicht

Technische Daten

- › Eingangsspannung (für Module): 3,3 V oder 5 V, abhängig von der Mikrocontrollerplatine
- › Eingangsspannung (Quelle): Maximal 50 VDC
- › Max. Strombelastung: 5 A
- › Spannungsteiler für die Messung der Quellspannung
- › INA169-Modul für Strommessung
- › Spannungsteiler für INA169 Modul für 3,3 V basierte MCUs
- › ADS1015 ADC-Modul mit 12-Bit-Auflösung
- › OLED-Display zur Anzeige der Echtzeit-Leistungsmessungen

verwendet wird, so dass die Rohdaten der Sensoren mit einem anderen ADC, zum Beispiel dem internen ADC des Mikrocontrollers, abgetastet werden können. Der Anschluss K8 erlaubt es, den ADS1015 in vollem Umfang zu nutzen, wenn beispielsweise eine andere analoge Spannung gemessen werden soll.

Die Anschlüsse K9 und K10 sind für das OLED-Display vorgesehen. Warum zwei Anschlüsse? Wir wollten auch hier maximale Flexibilität bieten, denn es gibt diese OLED-Displaymodule mit dem 3,3-V-Anschluss an Pin 1 oder an Pin 2.

Die Eingangsspannung der Batterie oder der Stromquelle am Anschluss K12 sollte bei dem aktuellen Spannungsteiler mit $R1 = 100 \text{ k}\Omega$ und $R2 = 6,7 \text{ k}\Omega$ nicht den Wert von 50 V überschreiten. In Hinblick auf Vielseitigkeit wurde ein optionaler variabler Widerstand RV1 hinzugefügt, um den Spannungsteiler an die Anforderungen der Anwendung anzupassen. Außerdem sollte der maximale Laststrom 5 A nicht überschreiten, da dies das oberste Limit des INA169-Breakout-Boards ist. Wir haben die technischen Eigenschaften im Textkasten **Technische Daten** zusammengefasst.

Das Platinenlayout

Für die grundlegende Schaltung in **Bild 3** hat das Elektor-Team mit KiCad 7 eine passende Platine [5] entworfen. In der Abbildung sind die

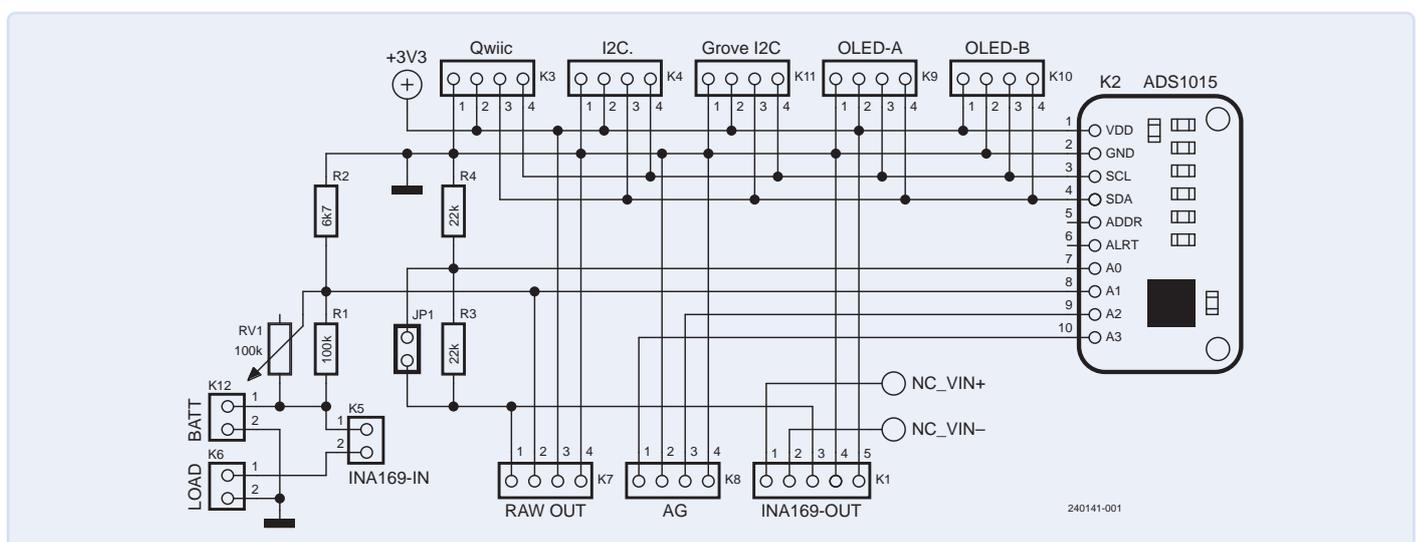


Bild 2. Schaltplan des AmpVolt-Moduls.

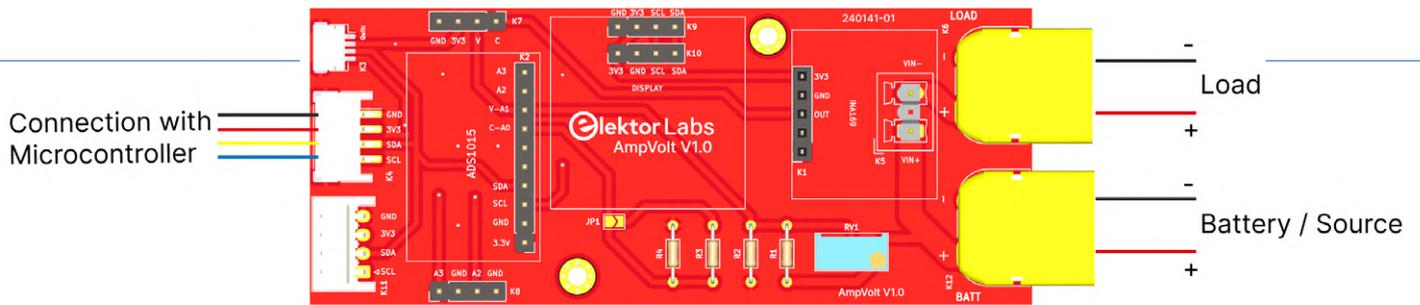


Bild 3. Verdrahtung des AmpVolt-Moduls.

eigentlichen BoBs nicht vorhanden, aber sie werden natürlich benötigt. Das Design der einfachen und kompakten Platine in **Bild 4** und **Bild 5** mit den Abmessungen 96,5 mm × 40 mm erlaubt einen bequemen Anschluss in Reihe zwischen der Quelle und der Last. Die „Hochspannungs-“ und die MCU-Schnittstellen befinden sich auf gegenüberliegenden Seiten, was die elektrische Sicherheit und die Flexibilität

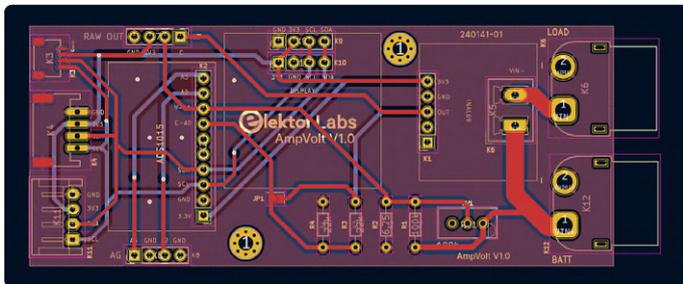


Bild 4. Das Platinenlayout des AmpVolt-Moduls.

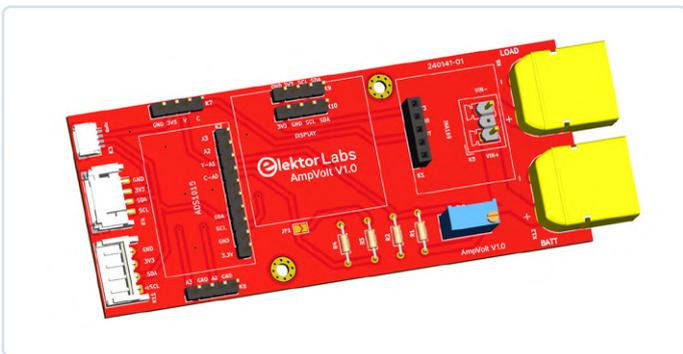


Bild 5. 3D-Rendering der Platine.



Bild 6. AmpVolt-Modul im Testaufbau.

bei der Montage der Platine erhöht. Die Platine lässt sich mit zwei M3-Schrauben sicher im Gehäuse befestigen. Für spezielle Anwendungen ist ein 3D-gedrucktes Gehäuse vorgesehen.

Die Spannungsteiler sind optimal neben den Stromversorgungsanschlüssen positioniert, um parasitäre Widerstände und elektromagnetische Störungen zu minimieren, was der Signaltreue zugutekommt. Die zentrale Platzierung des OLED-Displays ermöglicht eine unkomplizierte Datenüberwachung, während das ADS1015-ADC-Modul und die MCU-Anschlüsse nebeneinander angeordnet sind, um die Länge der Leiterbahnen und damit die Signalverschlechterung möglichst gering zu halten. Darüber hinaus ist das Stromsensormodul INA169 strategisch in der Nähe des Lastabschlusses platziert und wird von 4 mm kurzen, breiten Leiterbahnen bedient, die einen hohen Strom verkraften können. Dies unterstreicht den Fokus des Entwurfs auf Betriebsintegrität und Benutzersicherheit.

Die Software

Wir haben eine Standard-Firmware für einen ESP32-C3 mit der Arduino-IDE erstellt. Unser Sketch [5] misst Spannung und Strom, zeigt diese Werte auf einem OLED-Display [6] an und berechnet die Stromaufnahme und den Ladezustand (SoC) einer angeschlossenen Batterie. Die Firmware ist so konzipiert, dass sie mit verschiedenen Mikrocontrollern zusammenarbeiten kann, und richtet auch die serielle Kommunikation und den I²C-Bus für das ADC-Modul und das OLED-Display ein. In **Bild 6** sehen Sie den AmpVolt-Prototyp in Aktion. Zu den Schlüsselfunktionen des Codes gehören `readVoltage()` und `readCurrent()`, die den ADS1015 zur Messung der Spannung über den Spannungsteiler und des Stroms durch einen Stromsensor verwenden. Die Energieaufnahme wird durch Integration der Leistung über die Zeit berechnet. Genauer gesagt, akkumuliert der Code in kleinen Zeitintervallen die „verbrauchte“ Energie und wandelt diese Momentanwerte der Leistung (gemessen in Watt) in Energie (Watt-Stunden, Wh) über diese Zeiträume um. Die Berechnung basiert auf der folgenden Formel:

$$\text{Energy consumed [Wh]} = \sum \left(\frac{\text{Power [W]} \times \text{Time [s]}}{3600} \right)$$

Dabei wird die Leistung (W) als $U \times I$ (Spannung mal Strom) berechnet, und das Zeitintervall ist die Dauer zwischen aufeinanderfolgenden Berechnungen der Energie in Sekunden, die durch Division durch 3.600 (die Anzahl der Sekunden in einer Stunde) in Stunden umgerechnet wird. Mit dieser Methode wird die Leistung effektiv über die Zeit integriert und die Gesamtenergieaufnahme abzuschätzen.

In der Loop-Funktion wird die aufgenommene Energie aktualisiert, indem die für jedes Intervall (in diesem Fall jede Sekunde) berechnete Leistung zu einer Gesamtsumme aufaddiert wird. Diese fortlaufende Summierung liefert ein dynamisches Maß für die im Laufe der Zeit bezogene Energie, so dass das System den Energiebedarf während des Betriebs des Moduls genau verfolgen und melden kann.

Die Berechnung des Ladezustands (State of Charge, SoC) dient der Überwachung der Batterielebensdauer und der Nutzungseffizienz. Er wird durch das Verhältnis der abgegebenen Energie zur Gesamtkapazität der Batterie bestimmt und als Prozentsatz ausgedrückt. Die verwendete Formel lautet:

$$\text{State of Charge (SoC)} = \left(\frac{\text{Energy Consumed}}{\text{Battery Capacity}} \right) \times 100\%$$

Dabei ist „Energy Consumed“ die kumulierte Energieabgabe über einen bestimmten Zeitraum, gemessen in Wattstunden (Wh), und „Battery Capacity“ ist die Gesamtenergiekapazität der Batterie, ebenfalls in Wh. Diese Berechnung liefert einen Echtzeit-Schnappschuss darüber, wie viel Energie der Batterie im Verhältnis zu ihrer Gesamtkapazität entnommen wurde, was einen wertvollen Einblick in die verbleibende Batterielebensdauer gewährt und auch den Zeitpunkt signalisiert, zu dem ein Aufladen ratsam sein könnte.

Abtastrate

Der ADC ADS1015 verfügt laut Datenblatt über eine maximale Abtastrate von 3.300 Samples/s. Beim Betrieb innerhalb des Arduino-Frameworks erfährt diese Rate jedoch eine bemerkenswerte Anpassung. Insbesondere im Single-Shot-Testmodus reduziert sich die Abtastrate auf 312 Samples/s, während sie im kontinuierlichen Modus immerhin bis zu 1500 Samples/s erreichen kann. Diese Verringerung ist auf den *Hardware Abstraction Layer* (HAL) von Arduino zurückzuführen, der zwar die Abstraktion und Einfachheit des Codes gewährleistet, dem ESP32 jedoch eine erhebliche Geschwindigkeitseinschränkung auferlegt. Während der Testphasen wurden Anstrengungen unternommen, die Abtastrate zu verbessern, indem die I²C-Geschwindigkeit von den standardmäßigen 10 kHz auf 90 kHz erhöht wurde. Dies führte aber nur zu einer bescheidenen Steigerung von etwa 20...30 Samples/s im Single-Shot-Testmodus und 100 Samples/s im kontinuierlichen Modus. Dieses Ergebnis verdeutlicht, wie das Arduino-Framework die Möglichkeiten des ESP32 einschränkt. In seiner nativen Umgebung, etwa dem ESP-IDF, lassen sich mit dem ESP32 deutlich höhere Abtastraten erzielen, weil das Framework eine direktere Kontrolle über die Hardware bietet und so die vollen Sampling-Fähigkeiten des ADS1015 freisetzen kann.

Um jedoch ein breiteres Publikum anzusprechen und entsprechende Zugänglichkeit zu gewährleisten, soll es bei der zuerst beschriebenen Firmware-Implementierung innerhalb des Arduino-Frameworks bleiben, um ein Gleichgewicht zwischen Leistung und Einfachheit zu erreichen. Es gibt jedoch eine Option, trotz der einfachen Programmierung in der Arduino-IDE (und all ihren Bibliotheken) höchste Messleistung zu ermöglichen: die Verwendung von zwei Mikrocontrollern.

Serielle Schnittstelle

In der Elektor-Firmware haben wir bereits eine einfache Software-Schnittstelle eingebaut, um Daten an einen anderen „Application Controller“ (oder über eine Seriell-USB-Brücke an einen PC) zu senden. Dieser Applikationscontroller, der beispielsweise der Hauptcontroller eines IoT-Projekts sein könnte, ist von jeglicher Abtastung analoger Werte und Leistungs-/Energieberechnungen befreit. Dies bleibt weiterhin Aufgabe des „Measurement Microcontroller“.

Die Funktion `sendData()` verwaltet die serielle Kommunikation, indem sie auf spezifische Befehle des Applikationscontrollers reagiert, die

über die serielle Schnittstelle empfangen werden. Wenn ein Befehl empfangen wird, bestimmt die Funktion die Art der angeforderten Daten – sei es Spannung (`#v`), Strom (`#i`) oder Leistung (`#p`) – und führt dann die erforderliche Messung durch, indem sie entweder `readVoltage()` oder `readCurrent()` aufruft oder die Leistung direkt innerhalb der Funktion berechnet.

Die Funktion `calculateAndSendAdditionalData()` dient einem umfassenderen Zweck, indem sie zusätzliche Metriken wie die Leistung und den Ladezustand einer Batterie berechnet und diese Daten dann für die Übertragung über die serielle Schnittstelle in eine JSON-Struktur verpackt. Hier ist eine schrittweise Aufschlüsselung dieses Prozesses:

- **Leistungsberechnung:** Es wird sowohl `readVoltage()` als auch `readCurrent()` aufgerufen, um die aktuellen Spannungs- und

Überblick über den Arduino-Sketch

Setup und globale Variablen

- Initialisiert die serielle Schnittstelle und den I²C-Bus mit spezifischen SDA- und SCL-Pins.
- Richtet das ADS1015-ADC-Modul zum Lesen analoger Eingänge und das OLED-Display für die Ausgabe ein.
- Definiert Konstanten für die Widerstandswerte in den Spannungs- und Stromteilern, um genaue Spannungs- und Strommessungen zu ermöglichen.
- Legt Variablen für die Berechnung der abgegebenen Energie über die Zeit und die Startzeit für die Berechnung der verstrichenen Zeit fest.

Hauptfunktionen

- `readVoltage()`: Liest und berechnet die Spannung auf der Grundlage der ADC-Werte und des Spannungsteilerverhältnisses, wobei eine eventuelle Verschiebung des Nullpunkts berücksichtigt wird
- `readCurrent()`: Ähnlich wie `readVoltage()`, berechnet jedoch den Strom anhand der ADC-Werte und des Stromteilverhältnisses
- `sendData()`: Sendet Daten (Spannung, Strom oder Leistung) auf der Grundlage des empfangenen Befehls über die serielle Schnittstelle
- `calculateAndSendAdditionalData()`: Berechnet zusätzliche Daten wie Leistung und Ladezustand und sendet sie dann im JSON-Format über die serielle Schnittstelle
- `readCommand()`: Liest Befehle von der seriellen Schnittstelle und gibt einen vollständigen Befehl zurück, wenn ein Zeilenumbruch erkannt wird

Display- und Utility-Funktionen

- `updateDisplay()`: Aktualisiert die OLED-Anzeige mit Werten für Spannung, Strom, Leistung und anderen relevante Daten
- `elapsedTimeAsString()`: Berechnet die verstrichene Zeit seit dem Start des Moduls und formatiert sie als String



Stückliste

Widerstände:

R1 = 100 k

R2 = 6,7 k

RV1 = 100 k, Mehrgang-Trimpoti oder nach Bedarf

R3,R4 = 22 k

Module:

Stromsensor-Breakout-Platine mit INA169 [3]

ADS1015-Breakout-Platine [4]

OLED-Anzeigemodul 128x64, 0,96" [5]

Außerdem:

K1 = 1xpolige Buchsenleiste, RM2,54 mm

K2 = 1x10-polige Stiftleiste, RM2,54 mm

K3 = Qwiic-Stecker für Platinenmontage

K4 = 1x4-poliger JST-Verbinder

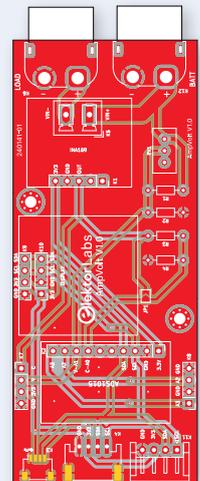
K5 = 1x3-polige Stiftleiste, RM2,54 mm

K6 = XT60PW-F (AMASS)

K7..K10 = 1x4-polige Stiftleiste, RM2,54 mm

K11 = Grove-Stecker für Platinenmontage

K12 = XT60PW-M (AMASS)



Strommessungen zu erhalten. Die Leistung wird dann durch Multiplikation dieser beiden Werte berechnet.

➤ **Berechnung des Ladezustands:** Der Ladezustand ist eine Abschätzung der verbleibenden Kapazität der Batterie. Er wird berechnet, indem die Leistung über die Zeit integriert wird, um die entzogene Energie zu bestimmen. Diese wird dann mit der im Code vordefinierten Gesamtkapazität der Batterie (`batteryCapacityWh`) in Beziehung gesetzt und der SoC als Prozentsatz der Gesamtkapazität ausgedrückt.

➤ **Datenformatierung und -übermittlung:** Nach der Berechnung dieser Messungen formatiert die Funktion alle Werte in einen JSON-String. Diese Zeichenkette enthält Angaben für Spannung, Stromstärke, Leistung, bezogene Energie und den SoC, die auf jedem Gerät, das die seriellen Daten empfängt, leicht geparkt und weiter verwendet werden können.

Der Code verwendet `millis()`, um den Energieverbrauch zu verfolgen und regelmäßig zu aktualisieren, und fügt so ein Echtzeitelement zur Überwachung des Energieverbrauchs über einen längeren Zeitraum hinzu. Außerdem enthält er die Funktion `updateDisplay()`, um den OLED-Bildschirm mit den aktuellen Messwerten und anderen relevanten Informationen wie der verstrichenen Zeit seit dem Start zu aktualisieren, die mit der Funktion `eLapsedTimeAsString()` berechnet wird. Insgesamt ist der Code [5] einfach und konzentriert sich auf die genaue Erfassung elektrischer Messungen, die einfache Datenübertragung und die Bereitstellung von Echtzeit-Updates für den Benutzer über ein OLED-Display. In der Textbox **Überblick über den Arduino-Sketch** können Sie sich einen kurzen Überblick über den Code verschaffen.

Zukünftige Verbesserungen

Die Roadmap für die Optimierung des AmpVolt-Moduls umfasst mehrere technische Verbesserungen, die auf eine höhere Genauigkeit und Benutzerfreundlichkeit abzielen. Eine nennenswerte Aktualisierung wird die Integration einer Softwarekalibrierung sein. Es wird erwartet, dass diese Ergänzung die Präzision von Niederspannungs- und Strommessungen durch fortschrittliche Kurvenanpassungstechniken verbessert und Messfehler erheblich reduziert.

Darüber hinaus wird derzeit eine innovative Funktion entwickelt, die es ermöglicht, den Mikrocontroller direkt über den Source-Anschluss mit Strom zu versorgen. Diese Funktion würde die Anzahl der erforderlichen Bauteile reduzieren und die Integration der Schaltung rationalisieren. Darüber hinaus wird an der Entwicklung einer kundenspezifischen Erweiterungsplatine für die Kompatibilität mit der XIAO-Controller-platinenreihe von Seeed Studio gearbeitet, um die Vielseitigkeit und den Anwendungsbereich des Moduls zu erweitern. Die bevorstehende

zweite Variante dieses Projekts bezieht diese Verbesserungen ein und bietet damit noch präzisere und bequemere Lösungen für die Stromüberwachung. ◀

RG — 240141-02

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Wenn Sie technische Fragen 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.



Passende Produkte

➤ **Qoitech Otii Arc - Stromversorgung, Leistungsmesser und Datenerfassung**
www.elektor.de/19270

➤ **Alex Pozhitkov, boB Gudgel, „Renewable Energy at Home“, Elektor 2024**
Buch, Paperback, Englisch: www.elektor.de/20747
E-Buch, PDF, Englisch: www.elektor.de/20748

➤ **ESP-Terminal**
www.elektor.de/20526

WEBLINKS

[1] Datenblatt des Current Sense Amplifier INA169: <https://www.ti.com/product/INA169>

[2] Datenblatt des 12-bit-ADC ADS1015: <https://www.ti.com/product/ADS1015>

[3] Strommodul GY-169 - INA169: <https://t1p.de/hwi8a>

[4] 12-bit-ADC-Modul mit ADS1015: <https://t1p.de/4gbpn>

[5] Quellcode und Platinenlayout-Dateien des AmpVolt V1.0: <https://github.com/ElektorLabs/AmpVolt>

[6] 0,96-Zoll-OLED-Display (Blau, I²C, 4-Pin): <https://elektor.de/products/0-96-oled-display-blue-i2c-4-pin>

EDITOR'S PICKS

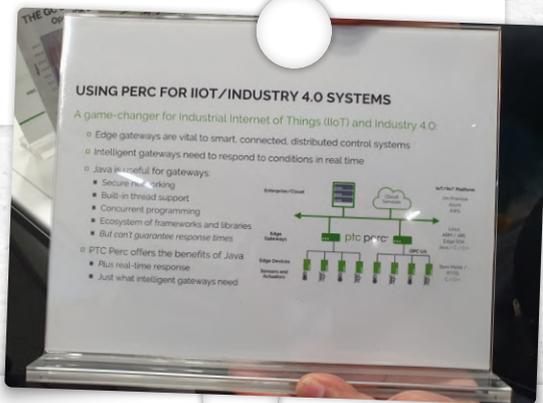
embedded world 2024

Die embedded world 2024 fand vom 9. bis 11. April in Nürnberg statt. Sie war ein Muss für alle, die sich mit Mikrocontrollern und Tools beschäftigen. In diesem Jahr gab es 32.000 Besucher und mehr als 1.100 Aussteller in sieben Hallen. Die Elektor-Redakteure Brian Tristram Williams und Jens Nickel sowie die Elektor-Lab-Ingenieure Jean-François Simon und Saad Imtiaz nutzten die Gelegenheit, sich umzuschauen und viele interessante Neuheiten zu entdecken. Wie immer kann ihre persönliche Auswahl nur ein kleiner Ausschnitt aus allen Innovationen sein, die auf der Messe zu sehen waren. Noch mehr Informationen finden Sie auf unserem YouTube-Kanal:

www.youtube.com/ElektorIM.

PTC

Java ist eine leistungsfähige Sprache für die plattformübergreifende Programmierung mit einem gigantischen Ökosystem. Aber wenn es um Echtzeitanwendungen geht, ist Java wegen der unberechenbaren Garbage-Collector-Prozesse nicht geeignet. Die Perc Real-Time Java Plattform von PTC füllt diese Lücke mit einer virtuellen Maschine und einem Toolset für Echtzeitverhalten. IoT-Gateways sind nur eine mögliche Anwendung. www.ptc.com/en/products/developer-tools/perc

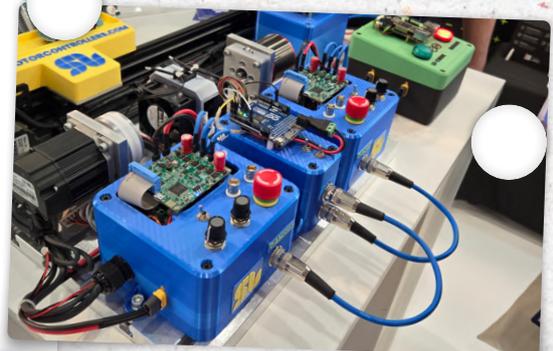


Arduino

Arduino stellte einige neue Pro-Lösungen vor, zum Beispiel neue Erweiterungsblöcke für das Opta-Modell, die mehr Ein- und Ausgänge ermöglichen. Der *Opta Digital Expansion Block* integriert 16 programmierbare Eingänge (0...24 V digital oder 0...10 V analog) und acht Ausgänge, mit einer Auswahl von acht elektromechanischen oder Solid-State-Relais, je nach Modell. Der *Opta Analog Expansion Block* bietet sechs programmierbare Eingänge (0...10 V oder 4...20 mA) und sechs programmierbare Ausgänge (0...10 V, 4...20 mA oder PWM). Diese Module wurden in Zusammenarbeit mit Finder entwickelt und ermöglichen es Fachleuten, ihre Automatisierungsprojekte zu erweitern, die sich gut in das Arduino-Ökosystem oder die Arduino PLC IDE integrieren lassen.

Ein Arduino-Partner, SOLO Motor Controllers, war ebenfalls anwesend und demonstrierte seine verschiedenen Motorsteuerungsmodule, die entweder von einem Arduino R4 oder einem Arduino Pro gesteuert werden. Der Demonstrationsprüfstand (siehe Foto) nutzte CANOpen zur Ansteuerung von Motoren und Linearaktuatoren.

www.arduino.cc/pro/hardware-arduino-opta-expansions
www.solomotorcontrollers.com/



seeed studio

TinyML Sensors AI on Modules

AI Vision

Demo Intro:
A custom AI Vision demo that recognizes people's face and poses. It gets the inferencing results from the Vision AI Sensor via serial port and then displays the results (pose and annotated line graph) on the host.

Used Products:
- Grove Vision AI V2 + OV5647-62
- F0V Camera algorithm (run on XIAO)
- Local processing & inferencing
- SenseCAP Indicator, V4M1 Display



Add AI to

Sensors
- add common sensors for real-time processing
- audio, flow, gas, temp, chemical, environmental
- connect to 1-wire, I2C, SPI

Rea
- Process and act
- Interact with other devices

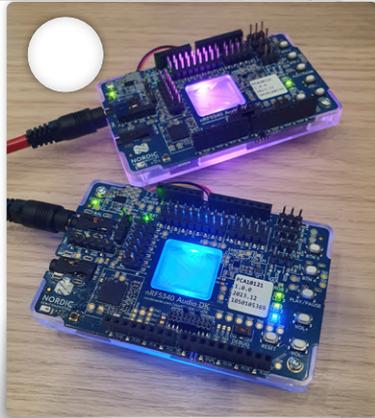
Seeed

Grove-Module sind bekannt für einfaches und schnelles Prototyping, und jetzt kommt KI ins Spiel. Künstliche Intelligenz kann für die Analyse kombinierter Daten von verschiedenen Grove-Sensoren (Sensorfusion) sowie für (grundlegende) Sprach- und Bildererkennung verwendet werden. Bereits verfügbar ist das Grove Vision AI Module V2, das mit einer Kamera und einem kompakten XIAO ESP32-S3 als Host-Controller kombiniert werden kann. Vorgefertigte Modelle sind auch auf der öffentlichen SenseCraft AI-Plattform verfügbar, und es werden noch weitere folgen. wiki.seeedstudio.com/grove_vision_ai_v2

Nordic

Bluetooth LE Audio kann die drahtlose Audioübertragung grundlegend verändern. Es ist nun möglich, einen linken und einen rechten Kanal von einer Quelle zu zwei verschiedenen Lautsprechern zu senden, unabhängig voneinander, aber in guter Synchronisation für Stereo. Zunächst denken wir vielleicht an batteriebetriebene Lautsprecher und Musik, aber das ist nicht die einzige Anwendung. Eine weitere Anwendung können Hörgeräte sein, die kompakter werden können, weil sie nicht mehr miteinander kommunizieren müssen. Nordic zeigte Audio-Entwicklungskits mit dem Namen nRF5340 Audio DK für ihren Chip nRF5340 Bluetooth LE 5.4. Wenn neue Technologien früh eingeführt werden, haben sie oft ihren Preis (etwa 180 € bei einigen großen Händlern), und man braucht mindestens zwei, besser aber drei davon. In naher Zukunft werden höchstwahrscheinlich billigere und weniger umfangreich ausgestattete Entwicklungsplatinen und Module auf den Markt kommen.

www.nordicsemi.com/Products/Development-hardware/nRF5340-Audio-DK



Batronix

Batronix bringt jetzt sein eigenes Oszilloskop mit dem Namen Magnova auf den Markt. Dieses Modell bietet einen neuen Ansatz, indem es die Benutzeroberfläche neu gestaltet. Es verfügt über ein großes 15-Zoll-Full-HD-Touchscreen-Display, vier Drehgeber und... das ist so ziemlich alles, abgesehen von einer Einschalttaste, einer Run/Stop-Taste und einer Single-Shot-Taste. Dieses Design sorgt für ein schlankes Erscheinungsbild, insbesondere mit den BNC-Anschlüssen an der Seite, wie Sie auf dem Foto sehen. Der kommerzielle Erfolg bleibt zwar abzuwarten, aber es ist sehr schön, dass es eine Innovation gibt. Batronix hebt mehrere Schlüsselattribute hervor: eine völlig neue Benutzeroberfläche, den großen matten Touchscreen, geräuschlosen Betrieb dank passiver Kühlung, fortschrittliche Software mit einer breiten Palette eingebauter Decoder ohne zusätzliche Kosten, gute analoge Fähigkeiten, einen 12-Bit-ADC, 4x1 GSa/s Abtastrate und drei Bandbreitenoptionen von 100 bis 350 MHz.

www.batronix.com/magnova



Cologne Chip

Wir hatten ein sehr nettes Gespräch mit Cologne Chip, bekannt als einer der wenigen FPGA-Hersteller mit Sitz in der EU. Sogar der Silizium-Die wird in einer deutschen „Fab“ hergestellt! Eine der interessanten Eigenschaften der GateMate-Familie ist die Skalierbarkeit. Die GateMate A1 und A2 sind ab sofort erhältlich, und der A4 wird in Kürze verfügbar sein. Sie sind alle pin-kompatibel, das heißt, Sie können Ihr Projekt mit einem GateMate A1 oder A2 prototypisieren und dann auf den A4 umsteigen, sobald dieser verfügbar ist, ohne Änderungen an Ihrem Layout vornehmen zu müssen. Die Chips bieten ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis und die Software-Toolchain ist Open-Source. Es gibt einige Entwicklungsplatinen, darunter eine erschwingliche von Olimex.

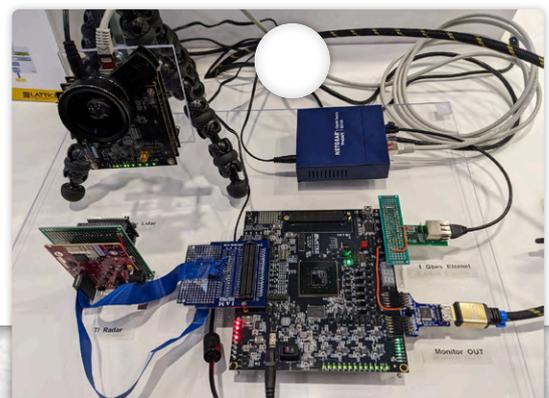
www.colognechip.com
www.olimex.com/Products/FPGA/GateMate/GateMateA1-EVB/open-source-hardware



Lattice

Auf der Messe konzentrierte sich Lattice hauptsächlich auf die Präsentation seiner High-End-Produkte mit geringem Stromverbrauch, wie den Lattice Avant-E. Es gab eine sehr schöne Demo, bei der Daten von mehreren Sensoren zusammengeführt wurden: eine Kamera für die On-Board-Bildererkennung, ein LiDAR, ein RADAR und so weiter. Der Aufbau der Demo ist hier zu sehen.

www.latticesemi.com/en/Products/FPGAandCPLD/Avant-E





LabTalk live von der Messe

Natürlich gab es auch wieder eine Live-Sendung direkt von der Messe. Unterstützt wurden die Elektor-Redakteure Brian T. Williams und Jens Nickel von Elektor-Autor und Video-Creator Stuart Cording, der ein langjähriger Experte auf dem Gebiet der Mikrocontroller und Tools ist. In der einstündigen Sendung fachsimpelten Stuart, Brian und Jens mit den Elektor-Lab-Ingenieuren Saad Imtiaz und JF Simon über die interessantesten Dinge auf der embedded world 2024. Besondere Gäste: Pedro Minatel und Anant Gupta von Espressif. ◀



Wenn Sie den Live-Stream verpasst haben, können Sie sich das Video ansehen unter:
<https://youtu.be/eYugqSVYgY0>



Raspberry Pi

Raspberry Pi hat brandneue, noch nicht angekündigte Produkte vorgestellt, darunter den M.2-HAT+ für SSD-Anwendungen und den neuen Raspberry-Pi-Monitor. Ein spannendes neues Produkt ist ein brandneues Raspberry-Pi-AI-Kameramodul, das genauso aussieht wie jedes andere Kameramodul des Unternehmens. Bei diesem Modul befindet sich jedoch die gesamte KI-Leistung auf dem Modul selbst, was bedeutet, dass es für Sie arbeitet, auch wenn es nur mit einem Raspberry Pi der Zero-Reihe verbunden ist. Der Beweis wurde mittels zwei Demonstrationen erbracht, von denen eine eine Live-Objekterkennung mit 30 Bildern pro Sekunde durchführte, während das andere in der Lage war, Menschen in Echtzeit zu erkennen und mit Wireframes zu überlagern.
raspberrypi.com



Espressif Systems

Espressif Systems stellte kürzlich mehrere neue Produkte vor, darunter die Modelle ESP32-C5, -C6 und -C61. Der ESP32-C5 verfügt über Dual-Band-WLAN-Konnektivität für den gleichzeitigen Betrieb auf den Frequenzen 2,4 GHz und 5 GHz. Dies verbessert die Konnektivität in einer Reihe von IoT-Anwendungen. Das ESP32-H2 ist derzeit für Endverbraucher schon erhältlich, während das leistungstärkste Modul in Espressifs Produktpalette, das ESP32-P4, im August auf den Markt kommen soll. Der ESP32-P4 ist für hochleistungsfähige Sicherheitsanwendungen konzipiert und verfügt über eine integrierte Hochgeschwindigkeits-Peripherie für eine verbesserte Verbindung. Seine Dual-Core RISC-V-CPU kann bis zu 400 MHz erreichen. Er stellt eine führende Lösung für eingebettete Systeme und IoT dar, da er fortschrittliche Mensch-Maschine-Schnittstellen und effektives Edge-Computing ermöglicht.
www.espressif.com/en/products/socs/esp32-p4



M5Stack

M5Stack wird mehrere neue Produkte für verschiedene Anwendungen auf den Markt bringen, die alle die ESP32-Chips von Espressif nutzen. Der ultrakompakte NANO C6, etwa so groß wie eine Fingerspitze und mit dem ESP32-C6-Chip ausgestattet, bietet fortschrittliche Konnektivitätsfunktionen, die sich für Umgebungen mit begrenztem Platzangebot eignen. Der CORE MP135 konzentriert sich auf Langstrecken-Konnektivität mit LoRaWAN und LTE, ideal für IoT-Anwendungen. Der Cardputer, ein einzigartiger, kartengroßer Computer mit OLED-Display und Tastatur, die vom ESP32-S3 gesteuert werden, bietet umfangreiche I/O-Funktionen und verbindet Portabilität mit Funktionalität. M5Stack stellte außerdem die StamPLC, eine programmierbare Stromversorgung und ein digitales Multimeter (DMM) vor, die alle auf dem ESP32-S3 basieren. Diese Tools zielen auf die Verbesserung von Automatisierungs-, Mess- und Steuerungssystemen ab.
www.m5stack.com



RG – 240239-02

Reparatur von elektronischen Geräten

Werkzeuge, Techniken und Tipps

Von Jean-François Simon (Elektor)

Die Fähigkeit, elektronische Geräte selbst zu reparieren und Fehler zu erkennen und zu beheben, spart nicht nur Geld, sondern verlängert auch die Lebensdauer Ihrer Geräte. Außerdem ist es eine sehr bereichernde Erfahrung! Von der Beherrschung der wichtigsten Werkzeuge über Techniken zur Fehlersuche bis hin zur Erklärung häufiger Bauteilfehler wird dieser Leitfaden dazu beitragen, Ihr Selbstvertrauen bei der Reparatur zu stärken und die Lebensdauer Ihrer Geräte zu verlängern.

Werfen wir zunächst einen Blick auf die Werkzeuge, die für die meisten elektronischen Reparaturen nützlich sind. Natürlich hat jeder seine eigene Liste von Lieblingswerkzeugen, je nach persönlicher Vorliebe. Hier ist meine Liste. Wenn Sie Anfänger sind, gibt Ihnen das vielleicht ein paar Anhaltspunkte. Wenn Sie nur ein oder zwei dieser Werkzeuge haben und Ihnen die Liste viel zu lang oder viel zu teuer erscheint, keine Panik! Einerseits kann man immer darauf verzichten, bis man beschlossen hat, dass es an der Zeit ist, ein neues Werkzeug zu kaufen, und andererseits kann man die



Bild 1. Unverzichtbare Werkzeuge.

meisten dieser Dinge entweder sehr billig in China oder zu erschwinglichen Preisen auf dem Gebrauchtmart in jedem Land finden. Beginnen wir mit den wichtigsten Werkzeugen (**Bild 1**). Sie brauchen mindestens: ein Multimeter, einen Lötkolben und Lötzinn, ein Oszilloskop und ein regelbares Netzgerät. Um die Lötstellen zu prüfen und die Platine auf Defekte zu untersuchen, ist eine kleine Lupe mit einer ausreichend hohen Vergrößerung (in meinem Fall 10x) eine wertvolle Hilfe. Selbst eine sehr preiswerte Lupe ist unendlich viel besser als gar keine Lupe; ich persönlich benutze ein 3-Euro-Kunststoffmodell von RS (Nr. 136-8106), das mir gute Dienste leistet.

Man kann darüber streiten, aber meiner Meinung nach sind ein zweites Multimeter und ein zweiter Lötkolben ebenfalls unverzichtbare Werkzeuge. Zwei Multimeter

gleichzeitig sind nützlich, unter anderem zum Testen von Netzteilen, indem man die Ausgangsspannung überwacht, während man den Ausgangsstrom erhöht. Der zweite Lötkolben ist als Ergänzung zum ersten Lötkolben fast unersetzlich, da man mit einem Lötkolben in jeder Hand alle Arten von SMDs auslöten kann.

Apropos Löten, hier ein paar zusätzliche Hilfsmittel. Entlötlitze (ich empfehle die verzinnete Variante) und Flussmittelgel. Für die Reinigung nach dem Löten eignen sich Wattestäbchen und 99%iger (oder notfalls 90%iger) Isopropylalkohol. Ich empfehle, den Alkohol in kleine Plastikflaschen (50 ml oder 100 ml) abzufüllen, um kleine Mengen auftragen zu können, und eine dieser Flaschen für eine 50/50%ige Isopropyl-Aceton-Mischung zu verwenden - sehr wirksam bei schwer zu entfernenden Rückständen.

Wenn Sie es sich leisten können, ist ein professioneller Reiniger wie Fluxclene oder Kontakt LR natürlich gut, aber nicht unbedingt erforderlich. Um starke Korrosion zu entfernen, die durch das Eindringen von Wasser oder den Austritt von Elektrolyt aus einem Kondensator verursacht wurde, ist ein Glasfaserstift sehr nützlich.

Optionale Werkzeuge als Retter in der Not

Optional bedeutet: Man kann auch ohne diese Werkzeuge auskommen, aber wenn man sie einmal gekauft hat, erweisen sie sich als sehr nützlich. Ich empfehle eine preiswerte Entlötlstation. Mit ihr lassen sich Transistoren, Kondensatoren, DIP-ICs, Steckverbinder, Relais und so weiter so schnell

Zwei frühere Reparaturen

Einmal führte ich eine Fehlersuche an einer mit einer Lithium-Batterie betriebenen Fernbedienung für Industrieanlagen durch, die nicht mehr funktionierte. Alles auf dem Board schien inaktiv zu sein. Kein Strom, keine Reaktion auf einen Tastendruck, selbst wenn ich die Batterie durch ein Netzteil ersetzte. Eine einfache Sichtprüfung brachte die Lösung: Der zentrale Stift des Steckers, der zum Laden der Batterie verwendet wird, war gebrochen. Infolgedessen hatte sich die Batterie entladen, und das für die Batterie zuständige Lade-/Überwachungs-IC hatte die gesamte Platine in den Tiefschlaf versetzt. Um diesen Schutz aufzuheben, müssen Sie die Batterie aufladen, und zwar nicht mit einem Labornetzteil, sondern mit dem betreffenden IC, was nicht möglich ist, wenn der Pin fehlt. Halten Sie die Augen offen!

Ein anderes Mal gab es einen ziemlich komplexen Motorcontroller, der anzeigte, dass ein Notausschalter aktiviert sei, obwohl dies nicht der Fall war. Ich identifizierte die für den Notausschalter vorgesehene Klemme, indem ich das Handbuch zu Rate zog (ein weiser Rat!), und folgte den Leiterbahnen zurück zu einem der Mikrocontroller auf der Platine, der gut zwanzig Zentimeter entfernt war, und überprüfte auf dem Weg dorthin zahlreiche Komponenten. Schließlich fand ich, kurz bevor das Signal den Mikrocontroller (nicht) erreichte, einen kurzgeschlossenen Transistor. Bingo! Das über 1.500 Euro teure Gerät wurde durch den Austausch dieses 20-Cent-Bauteils repariert.



Bild 2. Ein selbst gebauter Strombegrenzer.

und sauber auslöten, dass es schade wäre, zu lange ohne sie auszukommen, vor allem bei so günstigen Produkten wie den Modellen ZD-915 oder ZD-8915 für unter 100 €. Zu dieser Kategorie würde ich noch hinzufügen: ein ESR- oder LCR-Meter sowie einen sehr preiswerten Bauteiletester wie das Modell LCR-T4.

Ein Glühbirne als Strombegrenzer

In der Kategorie der kleinen, selbstgebauten Werkzeuge, die man im Laufe seines Lebens sammelt, würde ich auch einen Glühbirnen-Strombegrenzer erwähnen. Er ist besonders nützlich bei der Reparatur von Netzteilen, vor allem wenn diese Fehler wie kurzgeschlossene Diodenbrücken oder Transistoren im Primärkreis oder eine durchgebrannte Sicherung aufweisen. Nach der Reparatur ist es eine gute Idee, den maximalen Strom zu begrenzen, falls etwas übersehen wurde, um zu verhindern, dass dieselben Bauteile erneut durchbrennen.

Das Prinzip ist sehr einfach: Schalten Sie eine Glühlampe mit einer entsprechenden Nennspannung in Reihe mit einer der beiden Stromversorgungsleitungen. Im Falle eines Problems (im schlimmsten Fall eines Kurzschlusses zwischen dem Außenleiter und dem Neutraleiter) gibt es keine Explosionen mehr; die Lampe leuchtet einfach auf und gibt Ihnen Zeit, die Verbindung ohne Schaden zu trennen.

Sie sollten mehrere Lampen mit unterschiedlichen Wattstärken haben, um je nach dem zu prüfenden Gerät den Strom auf einen höheren oder niedrigeren Wert zu begrenzen. Das geht ganz einfach mit ein paar Ersatzglühbirnen und einer Glühbirnenfassung; Sie schrauben einfach die Glühbirne Ihrer Wahl nach Bedarf ein.

Auch wenn in vielen Ländern klassische Lampen mit Glühwendel aus den Regalen der Geschäfte verschwunden sind, sind sie doch leicht im Internet erhältlich. Keinesfalls für diese Aufgabe geeignet sind natürlich Energiesparlampen oder LEDs.

Ich für meinen Teil habe mir einen etwas komplizierteren Aufbau als nötig gebastelt (**Bild 2**), indem ich mit einem Drehschalter mehrere kleine Halogenbirnen parallel geschaltet habe (20 W / 230 V, G9), so dass ich den Strom in fünf Stufen von 80 mA bis etwa 400 mA begrenzen kann.

Lassen Sie uns nun über Reparaturmethoden sprechen. Hier sind ein paar Dinge, die Sie vielleicht hilfreich finden.

Wie man elektronische Reparaturen durchführt

Machen Sie zunächst eine Bestandsaufnahme der Situation. Wissen Sie genau, wo der Fehler liegt? Wenn es sich um ein Gerät handelt, das Ihnen gehört oder das Sie selbst benutzt haben, als der Fehler auftrat, haben Sie wahrscheinlich eine ziemlich gute Vorstellung davon. Nehmen Sie sich aber die Zeit, sich alles zu notieren, was ein Hinweis sein könnte. Verfügt das Gerät über ein Display, das eine Fehlermeldung anzeigt? Läuft es im kalten Zustand und stockt nach dem Aufwärmen? Oder andersherum? Hat das Gerät einen mechanischen Schlag erlitten? Beeinträchtigt ein leichtes Klopfen den Betrieb des Geräts? All diese Anhaltspunkte helfen Ihnen bei der Fehlersuche, also übersehen Sie sie nicht. Versuchen Sie, wenn möglich, den Fehler selbst zu beobachten, wenn es sich um eine Reparatur handelt, die Sie für jemand anderen durchführen. Schauen Sie im Internet nach, ob in irgendeinem Forum jemand das gleiche Problem mit dem gleichen Gerät hatte. Sehen Sie nach,

ob ein Wartungshandbuch oder Schaltpläne verfügbar sind.

Als nächstes folgt die Demontage. Denken Sie daran, Fotos zu machen, um den Wiederausammenbau zu erleichtern, und nummerieren Sie die Stecker an den Kabeln gegebenenfalls mit einem feinen Marker, damit Sie sie beim Wiederausammenbau eindeutig korrekt wieder anbringen können.

Zuerst die visuelle Inspektion

Beginnen Sie bei der Diagnose mit einer guten Sichtprüfung: Ich weiß nicht mehr, wie oft ich auf diese Weise, wenn schon nicht den genauen Fehler, so doch zumindest seine Position auf der Platine sofort erkennen konnte: durchgebrannte Bauteile, Anzeichen von Überhitzung, fehlende Bauteile (manchmal brechen die Anschlussleitungen von Bauteilen bei einem Aufprall ab, nachdem sie durch Temperaturschwankungen ermüdet wurden), gerissene Lötstellen und so weiter. Nutzen Sie auch Ihre anderen Sinne: gibt es einen verdächtigen Geruch? Ein seltsames Geräusch, wenn Sie das Gehäuse schütteln? Versuchen Sie, funktionale Einheiten zu identifizieren. Stromversorgungen, Platinen hinter Frontplatten, digitaler Steuer- teil, analoger Teil, Ausgangsstufen, falls vorhanden, und so weiter. Schlussfolgern Sie, um mögliche Fehlerquellen ausfindig zu machen.

Wählen Sie eine Richtung: Entweder in Flussrichtung (Energiefluss oder Informationsfluss) oder gegen den Fluss. Von den Eingängen zu den Ausgängen oder andersherum. Es gibt keine festen Regeln; zu Beginn können Sie willkürlich wählen und im weiteren Verlauf der Diagnose zwischen den beiden Techniken wechseln. Bei einem Netzteil, dessen Einschaltkontrollleuchte nicht leuchtet, ist es oft sinnvoll, mit dem Netzeingang zu beginnen und eins nach dem anderen in der Kette zu überprüfen: Sicherung OK, Diodenbrücke OK, Transistor der Leistungskorrektur OK und so fort. Wenn das Netzteil zwar eingeschaltet werden kann, aber nur an einem der zahlreichen Ausgänge ein Fehler vorliegt, ist es sinnvoller, beim Ausgang zu beginnen und sich rückwärts vorzuarbeiten.

Ist der Strom eingeschaltet?

Prüfen Sie zunächst die Stromschienen. Manchmal gibt es Prüfpunkte, ansonsten können Sie die Spannung an den Elektrolytkondensatoren messen. Übliche Spannungen sind 12 V, 5 V, 3,3 V und entsprechend negative Spannungen gegen Masse.



Bild 3. Sicheres Prüfen von Stromkreisen unter Spannung.

Eine schwankende oder fehlende Spannung weist Sie auf einen möglichen Fehler hin. Wenn die Stromversorgungen zu funktionieren scheinen, überprüfen Sie, ob die Funktionsblöcke, auf die Sie stoßen, auch mit Strom versorgt werden, indem Sie die Spannungen an den Stromversorgungsanschlüssen der ICs und Mikrocontroller messen. Anhand von Datenblättern und Erfahrungswerten können Sie feststellen, auf welche Pins Sie achten müssen. Falls die Spannung gleich Null ist, prüfen Sie mit einem Ohmmeter, ob die Schiene nicht mit der Masse kurzgeschlossen ist. Ist dies der Fall, suchen Sie nach dem Kurzschluss; ist dies nicht der Fall, suchen Sie weiter vorne, um herauszufinden, warum das Netzteil nicht eingeschaltet ist.

Wann immer möglich, versuche ich, so wenige Bauteile wie möglich auszulöten. Dennoch kommt es vor, dass man im Zweifelsfall ein Bauteil auslöten muss, um eine Messung zu bestätigen, insbesondere bei der Suche nach Kurzschlüssen. Aber Vorsicht! Ich bin schon oft auf Platinen ohne Bestückungsdruck gestoßen, und es kann jedem passieren, dass man versehentlich ein IC der Sorte SO-8 oder SO-14 verdreht einlötet, was beim nächsten Test zu Ärger und Frustration führt. Schauen Sie sich die Fotos an, die Sie vorher gemacht haben!

In dieser Phase der Fehlersuche müssen Sie wahrscheinlich häufig zwischen dem Testen von Bauteilen im Schaltkreis (ohne Strom), dem Auslöten, dem erneuten Einlöten, dem Austauschen von Bauteilen, dem Testen mit eingeschaltetem Strom und so weiter abwechseln. Nehmen Sie sich auf jeden Fall Zeit und behalten Sie einen klaren Kopf. Und vor allem: Löten Sie niemals an einem stromführenden Schaltung! Und stellen Sie sicher, dass dies auch nicht aus Versehen geschieht. Abgesehen vom Sicherheitsaspekt besteht die Gefahr, dass Sie mit dem LötKolben zwei

benachbarte Lötäugen kurzschließen und dadurch Schäden verursachen.

Sicheres Messen

Führen Sie niemals Oszilloskopmessungen auf der Primärseite (Netzseite, vor dem Transformator) einer Stromversorgung durch, es sei denn, Sie sind umfassend informiert und verfügen über eine gewisse Erfahrung mit Differenzstastköpfen und Trenntransformatoren. Auf der Sekundärseite gibt es weniger Sicherheitsrisiken, aber immer noch das Risiko, Fehler zu verursachen. Anstatt das Risiko einzugehen, mit der Sondenspitze abzurutschen, ziehe ich es oft vor, ein kleines Stück Draht an den betreffenden Knotenpunkt zu löten und die Sonde daran anzuklemmen. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von hochwertigen, dünnen Mini-Greifern, wie die von EZ-Hook (siehe **Bild 3**). So habe ich die Hände frei, um den Ein-/Ausschalter und die Steuerelemente des Oszilloskops zu bedienen.

Als ich in einer Elektronikwerkstatt arbeitete, benutzte ich bei der Reparatur eines bestimmten Geräts meinen Computer ständig, um nach den Datenblättern und Pinbelegungen der unzähligen neuen Bauteile zu suchen, die ich nicht kannte. Wenn man ohne Schaltpläne arbeitet, die nur selten zur Verfügung stehen, und manchmal auf Platinen ohne Bestückungsaufdruck, sind SMD-Kennzeichnungslisten unschätzbare Hilfsmittel, um Bauteile zu identifizieren. [1] und [2] sind bekannte Beispiele, aber es gibt auch noch andere. Schließlich kommt der Moment, in dem Sie ein fehlerhaftes Bauteil gefunden haben. Kein Zweifel möglich, Ihre Messungen sind kategorisch und eindeutig: Das Teil ist durchgebrannt. Herzlichen Glückwunsch! Suchen Sie die Umgebung auf allen Leiterbahnen, die von allen Pads dieses Bauteils ausgehen, nach weiteren Schäden ab.

Bauteile ersetzen

Versuchen Sie, das Bauteil so weit wie möglich durch ein identisches zu ersetzen, indem Sie bei den üblichen Anbietern suchen: Farnell, RS, Mouser, Digikey, Distrelec, Reichelt und so weiter. Meiden Sie nach Möglichkeit eBay und Aliexpress, wo die Wahrscheinlichkeit, ein gefälschtes Bauteil zu erhalten, manchmal bis zu 100 % beträgt.

Wenn das Bauteil schwer zu beschaffen oder nicht mehr auf dem Markt ist, haben Sie keine andere Wahl, als ein gleichwertiges zu finden. Achten Sie auf die Art des Gehäuses, die Pinbelegung und die wichtigsten Eigenschaften: maximale Spannung und Stromstärke der Transistoren, Schaltgeschwindigkeit und so weiter. Zögern Sie im Zweifelsfall nicht, in einem Forum um Hilfe zu bitten, wo die Mitglieder im Allgemeinen sehr hilfsbereit und freundlich sind.

Im folgenden Abschnitt sehen wir uns einige häufige Fehler/Störungen an, die bei einigen der gebräuchlichsten Komponenten auftreten können, und geben einige Tipps zu deren Prüfung.

Gängige Bauteile, gängige Fehler

Es kann nützlich sein, eine Vorstellung von den Fehlerkategorien zu haben, die bei einer bestimmten Art von Bauteil auftreten können, damit Sie effektiv suchen können. Häufig hört man, dass Elektrolytkondensatoren die Übeltäter sind. Das trifft manchmal auf sehr preiswerte Schaltnetzteile zu, die

mit Kondensatoren gebaut werden, die auf 85 °C begrenzt sind, anstatt mit etwas teureren, die 105 °C aushalten. Oft ist der Spielraum sowohl in Bezug auf die Spannung als auch auf die Kapazität sehr gering, was die Kondensatoren übermäßig belastet, so dass sie in der Regel kurz nach Ablauf der gesetzlichen Garantie aufgeben und ausfallen.

Bei besser konzipierten Geräten oder bei Prüf- und Messinstrumenten und Industrieanlagen ist dies jedoch keineswegs der Regelfall. Im Folgenden finden Sie eine Liste häufiger Ausfälle, geordnet nach Bauteiltyp.

Elektrolytkondensatoren: Manchmal wölben sie sich, wie in **Bild 4** dargestellt, oder sie haben Elektrolyt verloren, verlieren an Kapazität oder haben einen zu hohen ESR-Wert. Testen Sie mit einem Multimeter im Kondensatormodus, einem ESR-Meter oder einem LCR-Meter. Aufgewölbte oder undichte Kondensatoren müssen ohne weiteres Testen ersetzt werden; bei normal aussehenden Kondensatoren ist eine Leitung abzulöten, um zu verhindern, dass benachbarte Bauteile die Messung beeinträchtigen.

Leistungstransistoren (bipolar oder MOSFET): Oft kurzgeschlossen, manchmal leiten sie gar nicht mehr. Mit Multimeter im Diodenmodus prüfen. Identifizieren Sie zunächst die Pinbelegung. Bei einem bipolaren Transistor prüfen Sie die Basis-Emitter- und Basis-Kollektor-Verbindungen. Prüfen Sie auch, ob ein Kurzschluss zwischen Kollektor und Emitter besteht. Prüfen Sie

bei einem MOSFET, ob die interne Diode des MOSFET zwischen Drain und Source messbar ist (Sperrschichtspannung 0,5 V oder 0,6 V) und ob das Gate von den anderen beiden Pins isoliert ist (**Bild 5**).

Leistungsdioden, Gleichrichterdiodenbrücken: Oft kurzgeschlossen, seltener leiten sie gar nicht mehr. Bei der Prüfung im Diodenmodus sollten Sie bei herkömmlichen Dioden in Durchlassrichtung eine Spannung von etwa 0,6 V oder 0,7 V und in Sperrrichtung OL (overload, unendlich) feststellen. Bei Schottky-Dioden ist die Spannung niedriger und liegt bei etwa 0,3 V.

Leistungswiderstände: Oft offen. Typischer Fall: Widerstände, die zur Begrenzung des Anlaufstroms von Schaltnetzteilen verwendet werden.

Bedrahtete- oder SMD-Dioden oder Z-Dioden und kleine bipolare oder MOSFET-Transistoren: Kurzgeschlossen oder offen. Testen Sie sie mit dem DMM im Diodenmodus.

Leistungs-ICs: sind solche, die potenziell etwas Wärme abführen müssen, zum Beispiel Motortreiber: Kurzschluss der Versorgungspins gegen Masse oder Kurzschluss der Ausgangspins gegen Masse oder Betriebsspannung. Dies ist häufig der Fall bei Schaltregler-ICs auf der Primärseite von Schaltnetzteilen. Insbesondere diejenigen, die die Steuerlogik und



Bild 4. Die berühmten Elektrolytkondensatoren mit wulstiger Kappe. (Quelle: Wikipedia [3])



Bild 5. Prüfung eines Leistungs-MOSFETs mit Hilfe eines DMM im Diodenmodus.

den Leistungstransistor im selben Gehäuse enthalten (wie der VIPER20 von ST und andere), sind empfindlich.

Kunststoff-Folienkondensatoren:

Kapazitätsverlust. Seltener: Kurzschluss. Kapazitätsverluste sind häufig, insbesondere wenn diese Kondensatoren als kapazitive Teiler verwendet werden, also um eine Spannung von einigen Volt zur Versorgung einer Logikschaltung aus der Netzspannung zu erhalten. In diesem Fall fließt permanent ein Wechselstrom durch den Kondensator, so dass dieser vorzeitig altert.

Transformatoren: Offener Stromkreis (durchgebrannt) oder Kurzschluss zwischen den Windungen oder Wicklungen (führt zu Überstrom und Überhitzung).

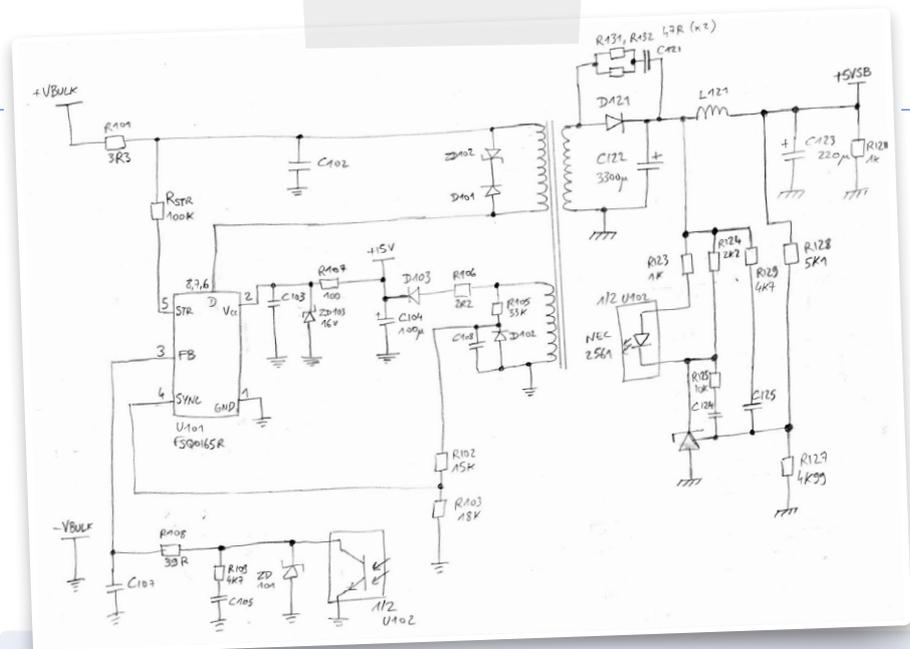
Bedrahtete oder SMD-Widerstände:

Manchmal sind sie sichtbar durchgebrannt, manchmal haben sie einen offenen Stromkreis zur Folge, was mit bloßem Auge nicht sichtbar ist. Das lässt sich leicht mit einem Ohmmeter überprüfen: Aufgrund der verschiedenen Bauteile, die parallel zum zu prüfenden Widerstand geschaltet sind, muss der gemessene Widerstand immer gleich hoch oder niedriger sein als der auf der Widerstandskennzeichnung angegebene Wert. Ist dies nicht der Fall, ist der Widerstand durchgebrannt oder stark hochohmig geworden.

SMD-Keramikkondensatoren:

Manchmal kurzgeschlossen. In diesem Fall ist die gesamte Versorgungsschiene mit der Masse kurzgeschlossen. Um den Kurzschluss auf der Platine zu lokalisieren, können Sie ein Labornetzteil verwenden. Stellen Sie die Spannung auf einen niedrigen Wert von 1 V oder 2 V und den maximalen Strom auf etwa 1 A ein.

Schließen Sie ihn an die Stromschiene an und achten Sie dabei auf die Polarität. Dadurch wird Strom in den Kurzschluss gezwungen. Verwenden Sie dann das Digitalmultimeter im Millivoltmeter-Modus, um sich dem Kurzschluss immer weiter zu nähern. Die Spannung ist über dem kurzgeschlossenen Kondensator am niedrigsten. Manche Leute empfehlen, ein leistungsstärkeres Netzteil zu verwenden und den Strom auf einen höheren Wert einzustellen. Dadurch kann sich das kurzschließende Bauteil erwärmen, was dann mit einer Wärmebildkamera sichtbar wird. Wenn Sie



Ein Netzteil, das nicht kooperieren wollte

hat mir viel Kopfzerbrechen beschert. Ich untersuchte ein fehlerhaftes ATX-Netzteil, ein CX400 von Corsair aus den 2010er Jahren. Es schaltete sich nach einiger Zeit ab. Das erste Problem bestand darin, dass das Netzteil zwar den PC einschaltete, aber auf meiner Werkbank kategorisch den Start verweigerte, als ich die klassische Technik anwandte, den grünen PS_ON-Draht gegen Masse kurzzuschließen, was meine Diagnose erschwerte. Da ich damals noch nicht so erfahren war, kam ich nicht sofort auf die Idee, eine zusätzliche ohmsche Last an die 5V_SB-Schiene (Standby-Versorgung) anzuschließen, um dieses Problem zu beheben.

Nachdem ich dies getan hatte, stellte ich eine beträchtliche Instabilität der 5V_SB-Spannung fest, mit einer sägezahnartigen Welligkeit von mehreren Volt in der Amplitude. Dennoch waren alle berüchtigt verdächtigen Elektrolytkondensatoren an diesem Ausgang (und auch an den anderen Ausgängen) in gutem Zustand. Um mir die Fehlersuche zu erleichtern, habe ich einen handgezeichneten Ausschnitt des Schaltplans angefertigt, wie obenstehend gezeigt. Ich empfehle Ihnen dringend, dasselbe zu tun, wenn Sie nicht weiterkommen. Schaltpläne, selbst unvollständige und handgezeichnete, sind immer hilfreich.

Tatsächlich befand sich in der Rückkopplungsschleife dieser Schiene der kleine SMD-Keramikkondensator C107, der Teil eines RC-Tiefpassfilters war. Dieser Kondensator war durchgebrannt und filterte nichts mehr, verursachte aber die Instabilität. Ein sehr seltener Fehler! Ein paar Jahre später stieß ich beim Stöbern in einem Forum auf jemanden, der dasselbe Problem mit demselben Bauteil im selben Netzteil hatte. Es handelte sich wahrscheinlich um einen Herstellungsfehler, der dazu führte, dass der Kondensator aufgrund von Temperaturschwankungen durchbrach.

diese Technik anwenden, seien Sie vorsichtig, ein höherer Strom könnte auch einige Leiterbahnen verbrennen. In sehr seltenen Fällen können diese Kondensatoren auch den Stromkreis unterbrechen - siehe den **Textkasten** über das Netzteil, das nicht kooperieren wollte.

Relais: Ihre Kontakte können nach einer großen Anzahl von Betätigungen hochohmig werden. Dies kann mit dem Ohmmeter an den Kontakten überprüft werden, indem man die Relaispule mit der entsprechenden Spannung aus einem Labornetzgerät versorgt. Achten Sie auf die richtige Spannung für die Spule und

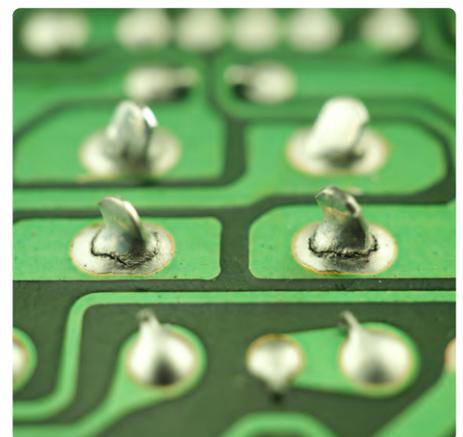
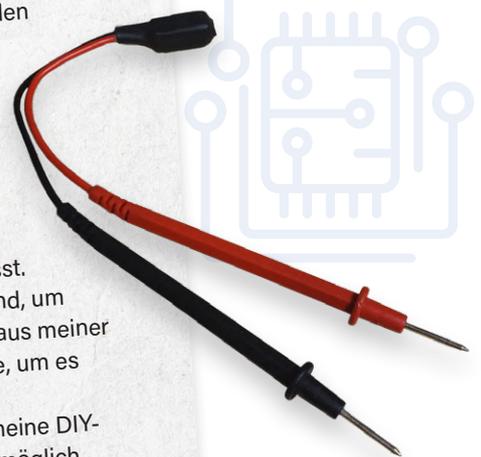


Bild 6. Diese Lötstellen haben schon bessere Tage gesehen.

Ein paar zusätzliche Hilfen

- › Verwenden Sie möglichst scharfe Tastspitzen, um die Oxidationsschicht auf Lötstellen zu überwinden und zuverlässige Messungen an Bauteilen vorzunehmen, ohne zu stark drücken zu müssen. Dadurch wird die Gefahr des Abrutschens verringert. Billige Messspitzen für Multimeter sind oft aus plattiertem Messing und werden schnell stumpf. Ich für meinen Teil verwende Edelstahlspitzen PRUEF 2 von Hirschmann. Sie sind sehr scharf, und ich schärfe sie regelmäßig auf einem kleinen Schleifstein nach.
- › Wenn die Bauteilmarkierungen durch einen dicken Klarlack, das so genannte „conformal coating“ schwer lesbar sind, lässt sich dieser oft mit Aceton entfernen, so dass man die Markierungen besser erkennen kann. Verwenden Sie Wattestäbchen und ein hartes Holzwerkzeug, zum Beispiel ein Essstäbchen, zum Kratzen. Verwenden Sie kein Metallwerkzeug, da dieses die Oberfläche des Bauteils zerkratzt und das Lesen der Markierung zusätzlich erschwert.
- › Einige Schaltnetzteile benötigen zum Betrieb eine Mindestlast. Ein geeigneter Leistungswiderstand reicht aus, ist aber nicht immer auf der Platine selbst zu finden. Denken Sie an die Mindestlast, wenn das Netzteil, das Sie untersuchen wollen, nicht anläuft oder seine Ausgangsspannung nicht richtig reguliert.
- › Manchmal werden SMDs vor dem Wellenlöten mit einem Punkt rotem Klebstoff geklebt, um sie zu halten, wenn sie auf dem Kopf stehen. Es ist schwierig, sie zu entlöten, ohne das Bauteil und die Pads zu beschädigen. Erhitzen Sie alle Anschlüsse gleichzeitig mit einer großen Lötspitze und reichlich Lötzinn. Bei kleinen Bauteilen mit zwei Anschlüssen kann eine „Messerspitze“ gut geeignet sein, um beide Seiten gleichzeitig zu erhitzen. Für größere Bauteile verwenden Sie zwei LötKolben. Führen Sie während des Erhitzens vorsichtig eine X-ACTO-Klinge unter das Bauteil, um den Kleber abzulösen.
- › Vorsicht vor geladenen Kondensatoren! Insbesondere Ladekondensatoren auf der Primärseite von Schaltnetzteilen sind oft auf 325 V aufgeladen. Manchmal ist ein spezieller Widerstand vorhanden, um sie zu entladen, wenn das Netz abgeschaltet wird, aber nicht immer. Prüfen Sie vor jedem Testen oder Messen mit einem Multimeter, ob die Kondensatoren vollständig entladen sind, und entladen Sie sie bei Bedarf. Ich verwende dazu ein Paar Multimetersonden, die über einen 2,7-k Ω -Leistungswiderstand (5 W) miteinander verbunden sind, wie auf dem nebenstehenden Foto zu sehen. Tun Sie dies nicht mit einem Schraubendreher, da dieser, die Lötstelle und auch der Kondensator durch die plötzliche Stromspitze beschädigt werden können.
- › Zum Öffnen von Schnappgehäusen aus Kunststoff sollten Sie keinen Schraubendreher verwenden, da dieser Dellen im Kunststoff hinterlässt. Sie können spezielle Spudger kaufen, die breiter, dünner und flexibler sind, um Beschädigungen zu vermeiden. Ich verwende ein altes Schälmesser aus meiner Küche, das ich absichtlich mit Schleifpapier komplett entschärft habe, um es völlig unschädlich zu machen.
- › Bleihaltiges Lötzinn ist für Prototypen neuer Schaltungen und allgemeine DIY-Projekte einfacher zu verwenden, und ich versuche es, wann immer möglich, einzusetzen. Obwohl es für den Prototypenbau prinzipiell zugelassen ist, kann es aufgrund der RoHS-Richtlinien schwierig zu kaufen sein. Beachten Sie, dass das Mischen von bleihaltigem und bleifreiem Lot beim Nacharbeiten einer Lötstelle zu schlechten Ergebnissen führt und vermieden werden sollte. Kaufen Sie entweder eine Rolle von beiden, oder entfernen Sie sorgfältig alle bleifreien Lotreste, bevor Sie mit der bleihaltigen Legierung nachlöten. Wählen Sie in jedem Fall eine gute Marke wie Loctite, Kester oder Stannol von einem vertrauenswürdigen Einzelhändler und vermeiden Sie unbekannte Marken von AliExpress.



die richtige Polarität, um eine Beschädigung der restlichen Schaltung zu vermeiden. Der Pluspol kann in der Regel ermittelt werden, indem man schaut, welcher der beiden Spulenanschlüsse mit der Kathode der Freilaufdiode verbunden ist, die sich oft in der Nähe befindet. Im Zweifelsfall sollten Sie das Relais auslöten, um es außerhalb der Schaltung zu testen.

Drucktasten: Manchmal kurzgeschlossen (was zu unregelmäßigem Betrieb des Geräts führt), manchmal kein Kontakt mehr (das Gerät reagiert nicht mehr), insbesondere wenn sie mit Wasser in Berührung gekommen sind.

Lötverbindungen: Einige bleifreie Legierungen neigen mit zunehmendem Alter zu Rissen, als Folge wiederholter Temperaturwechsel. Diese können mit bloßem Auge schwer zu erkennen sein, aber ein haarfeiner Riss kann ausreichen, um die Verbindung vollständig zu unterbrechen. Dies zeigt, wie wichtig es ist, die gesamte Platine mit einer Lupe zu untersuchen. Ein Beispiel für ziemlich große Risse ist in **Bild 6** zu sehen. Andere, viel dünnere Risse sind viel schwieriger zu finden.

Quarze: Sie sind im Allgemeinen zuverlässig, können aber nach einem mechanischen Stoß aufhören zu schwingen. Wenn der Mikrocontroller, an den ein Quarz angeschlossen ist, aktiv ist und einige LEDs blinken oder etwas auf dem LCD-Display angezeigt wird, wissen Sie, dass der Quarz funktioniert. Ist keine derartige Aktivität zu erkennen, ist es am einfachsten, einen der Anschlüsse mit einem Oszilloskop abzutasten, und zwar gegen Masse. Bewegen Sie dann die Sonde zum zweiten Anschluss. Sie sollten eine stabile Schwingung mit einer Amplitude von mindestens einigen hundert Millivolt bei der auf dem Quarz angegebenen Frequenz feststellen. Eines der Signale wird eine größere Amplitude haben als das andere - das ist normal.

Hinweis: Um die Oszillation nicht zu sehr zu stören, sollte eine 10x-Sonde verwendet werden. Manchmal stoppt die Eingangskapazität der Oszilloskopsonde die Schwingung eines Quarzes, obwohl der Quarz in Ordnung ist. Versuchen Sie es in diesem Fall erneut am zweiten Anschluss: Diesmal sollten Sie eine Oszillation sehen. Oszillatoren haben oft eine Eingangsseite mit einer hohen Impedanz, auf der dies vorkommen

kann. Die Ausgangsseite mit ihrer niedrigeren Impedanz ist weniger leicht zu stören. Wenn Sie an keiner der Anschlüsse etwas sehen, ist entweder der Mikrocontroller nicht eingeschaltet oder der Quarz defekt.

Andere Fehler: In einer Reparaturwerkstatt für Industrie-Elektronik stoßen wir auf Fehler, die sich ein wenig von denen unterscheiden, die bei Unterhaltungselektronik auftreten. So sind beispielsweise Flüssigkeitsschäden durch das Eindringen von Wasser beim Waschen von Maschinen sehr häufig. Da die Geräte mit hohen Spannungen (400 V) arbeiten und mit Leitungsschutzschaltern für erhebliche Ströme ausgestattet sind, können die Schäden schwerwiegend sein. Ich stieß häufig auf Brandflecken, verdampfte Leiterbahnen/Drähte/Steckverbinder, offene NTC-Thermistoren, kurzgeschlossene Varistoren sowie starke Oxidation auf Leiterbahnen, Pads und Bauteilen. Schließlich waren auch die Steckverbinder häufig oxidiert oder wiesen schlechte Kontakte auf, da sie sich aufgrund von Vibrationen gelöst hatten. Dies führt häufig zu Lichtbögen zwischen benachbarten Pins.

Schöne Aussichten

Nun sollten Sie in der Lage sein, Reparaturen mit mehr Zuversicht und Gelassenheit anzugehen. Ich möchte Sie ermutigen, es zu versuchen - die Ergebnisse und die Zufriedenheit, die Sie daraus ziehen werden, sind die Mühe wert. Zögern Sie auch nicht, sich in den Foren und auf YouTube umzusehen, wo Sie einige sehr interessante Inhalte finden werden. Jeder der Elektronikspezialisten auf YouTube hat seine eigene Persönlichkeit und seine eigenen, oft unterschiedlichen Methoden - das macht es so reichhaltig. Wenn es zum Beispiel um die Reparatur von Test- und Messgeräten geht, sind einige Videos von The Signal Path oder Feedback-Loop inspirierend; wenn es um Schaltnetzteile geht, produziert DiodeGoneWild Videos

voller Informationen; und schließlich, für Retro-Computer-Enthusiasten, schauen Sie sich die Videos von Tony359 an. Viel Glück bei Ihren Reparaturen und viel Spaß! ◀

SG — 240069-02

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Wenden Sie sich bitte an den Autor unter jean-francois.simon@elektor.com oder an die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.

Über den Autor

Jean-François Simon hat eine langjährige Leidenschaft für Elektronik und beschäftigt sich mit so unterschiedlichen Themen wie Schaltungsdesign, Testen und Messen, Prototyping, Spielen mit SDRs und mehr. Er liebt es, seine Werkzeuge und andere Systeme zu entwickeln, zu modifizieren und zu verbessern. Er hat einen Hintergrund im Ingenieurwesen und hat auch Spaß an Mechanik, Bearbeitung und allen technischen Dingen. Jean-François ist seit kurzem Mitglied der Elektor-Redaktion.



Passende Produkte

- > **PeakTech 3350 Multimeter**
www.elektor.de/products/peaktech-3350-multimeter
- > **UNI-T UPO1102CS 2-Kanal-Oszilloskop (100 MHz)**
www.elektor.de/20495
- > **DER EE DE-5000 LCR-Meter (100 kHz)**
www.elektor.de/20675

WEBLINKS

- [1] Katalog mit SMD-Markierungs-codes: <https://smd.yooneed.one>
- [2] Noch ein Katalog mit SMD-Markierungs-codes: <http://www.marsport.org.uk/smd/mainframe.htm>
- [3] Elkos mit „Häubchen“, Bildquelle: https://caps.wiki/wiki/File:D865PERL_bulge_2.jpg
- [4] YouTube-Kanal „The Signal Path“: <https://youtube.com/@Thesignalpath>
- [5] YouTube-Kanal „FeedbackLoop“: <https://youtube.com/@feedback-loop>
- [6] YouTube-Kanal „DiodeGoneWild“: <https://youtube.com/@DiodeGoneWild>
- [7] YouTube-Kanal „Tony359“: <https://youtube.com/@tony359>



Aller Anfang...

muss nicht schwer sein: Wir setzen die Verstärkertheorie fort!

Von Eric Bogers (Elektor)

Letztes Mal haben wir den Operationsverstärker, den so genannten Opamp, kennengelernt. Wir haben uns einige Verstärkerschaltungen angeschaut und gesehen, wie man die Verstärkung berechnet. Mit einigen zulässigen Vereinfachungen bleiben zwei sehr einfache, prägnante und aufschlussreiche Formeln übrig. In dieser Folge fahren wir mit einigen Eigenschaften und (leider auch) Unzulänglichkeiten dieses wunderbaren Bauteils fort.

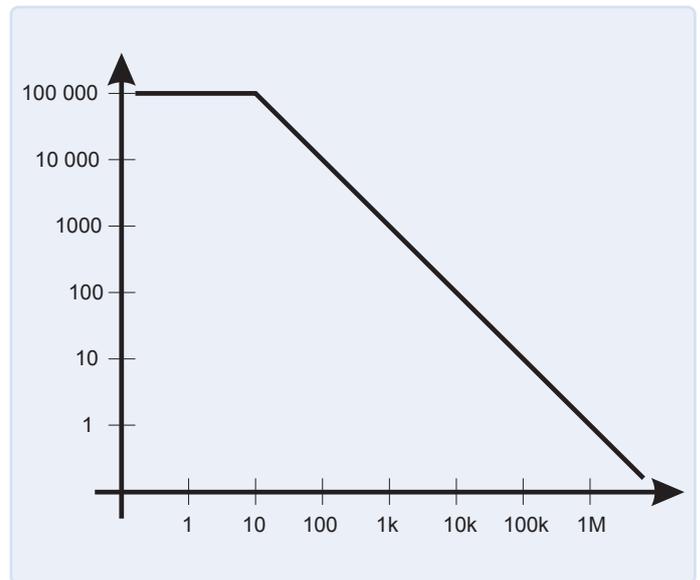


Bild 1. Die Leerlaufverstärkung als Funktion der Frequenz.

Leerlaufverstärkung und Übergangsfrequenz

Die Leerlauf- oder Open-Loop-Verstärkung eines Operationsverstärkers wird für Gleichspannungen angegeben. Bei Wechselspannungen nimmt die Verstärkung mit der Frequenz ab (**Bild 1**). Diese Abbildung zeigt den Verlauf der Leerlaufverstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz für einen intern frequenzkompensierten Operationsverstärker, auf den wir uns der Einfachheit halber beschränken. Die Leerlaufverstärkung nimmt um 20 dB pro Dekade ab, was 6 dB pro Oktave entspricht. Intern ist also ein Tiefpassfilter erster Ordnung vorhanden.

Für den Operationsverstärker in unserem Beispiel beträgt die Leerlaufverstärkung für Gleichspannung 100.000 und die Übergangsfrequenz — die Frequenz, bei der die Leerlaufverstärkung auf 1 gesunken ist — liegt bei 1 MHz. Wir sehen, dass die Leerlaufverstärkung bis etwa 10 kHz auf dem Gleichspannungsniveau von 100.000 bleibt, bevor sie um 20 dB pro Dekade abnimmt. Die Übergangsfrequenz wird übrigens auch als *unity gain frequency* bezeichnet.

Wir haben vorhin gesehen, dass für die Bestimmung der Verstärkung eines Operationsverstärkers die Leerlaufverstärkung irrelevant ist, sondern allein durch das Verhältnis zweier

externer Widerstände bestimmt wird. Dies gilt jedoch nur, solange die Leerlaufverstärkung deutlich größer ist als die mit diesen beiden Widerständen eingestellte Verstärkung.

Wenn wir eine Schaltung „sicher“ dimensionieren wollen, müssen wir dafür sorgen, dass die Leerlaufverstärkung mindestens um den Faktor 10 größer ist als die extern eingestellte Verstärkung. Wenn wir bei einem Operationsverstärker mit einer Übergangsfrequenz von 1 MHz die Verstärkung auf das 10-fache einstellen, können wir die Schaltung bis zu etwa 10 kHz betreiben. Operationsverstärker für Audioanwendungen müssen sich also nicht nur durch geringes Rauschen, sondern auch durch eine hohe Übergangsfrequenz auszeichnen – im Falle des NE5534 liegt sie beispielsweise bei 10 MHz.

Die maximale Anstiegsgeschwindigkeit

Ein Operationsverstärker wie der LM324 hat eine Übergangsfrequenz von 100 kHz, was für eine einfach verstärkende Pufferstufe in Audioanwendungen gerade noch ausreichend ist: Solange die Ausgangsspannung nicht viel mehr als etwa 100 mV beträgt, funktioniert eine solche Schaltung ohne Probleme.

Aber wenn die Amplitude der Ausgangsspannung beispielsweise



auf 10 V erhöht wird (bei einer Frequenz von 20 kHz), werden wir mit unangenehmen Verzerrungen bestraft. Dies ist ein Problem der maximalen Anstiegsgeschwindigkeit oder Slew Rate. Die Ausgangsspannung eines Operationsverstärkers kann sich nicht unendlich schnell ändern, und die Slew Rate gibt die maximal mögliche Geschwindigkeit der Änderung an (in Volt pro Zeiteinheit). Im Falle des LM324 beträgt die Anstiegsrate 0,05 V/μs. Die maximale unverzerrte Amplitude (top-to-top) ist dann

$$U_{pp} = \frac{S}{\pi \cdot f}$$

Und das bedeutet für den Effektivwert:

$$U_{eff} = \frac{S}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,05 \frac{V}{\mu s}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot 0,02 \frac{1}{\mu s}} = 0,28 \text{ V}$$

Für Audioanwendungen sollte eine Ausgangs-Spitzenspannung von 15 V möglich sein (um etwas Reserve für die Ausgangsspannung zu haben), und das bedeutet für die minimal erforderliche Slew-Rate:

$$S = U_p \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 15 \text{ V} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,02 \text{ MHz} = 1,88 \frac{V}{\mu s}$$

Offset-Strom

Bei Operationsverstärkern mit bipolaren Transistoren tritt das Problem auf, dass an den Eingängen kleine Ströme (in der Größenordnung von einigen Nanoampere) fließen. Diese Ströme verursachen einen Spannungsabfall an den externen Widerständen, die wiederum für einen entsprechenden Gleichspannungsoffset verantwortlich sind.

Diese Offset-Spannung, die dann am Ausgang des Operationsverstärkers auftritt, kann verringert werden, indem die externen Widerstände so klein wie möglich gemacht werden, wobei allerdings darauf zu achten ist, dass keine Probleme durch einen zu niedrigen Eingangswiderstand entstehen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Widerstände an beiden Eingängen so gleich wie möglich zu machen, wie in **Bild 2** skizziert.

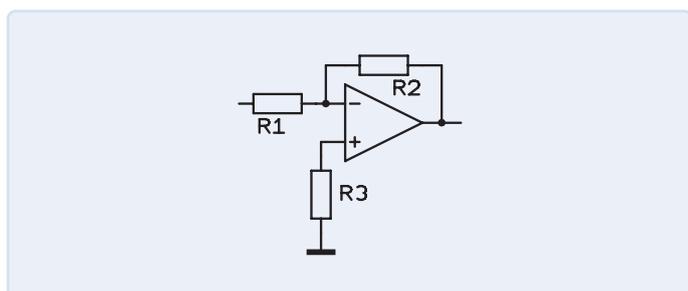


Bild 2. Verringerung des Gleichspannungsoffsets.

Der Widerstand R3 müsste in dieser Schaltung so gewählt werden, dass er den gleichen Wert hat wie die Parallelschaltung von R1 und R2: Wenn diese Werte von 10 kΩ und 100 kΩ hätten, würden wir für R3 einen Widerstand von 9,1 kΩ aus unserem Bauteilekasten wählen.

Eine alternative Lösung, die vor allem in der Audiotechnik verwendet wird, ist, die Offset-Spannung zu ignorieren und sie stattdessen durch den Einbau von Koppelkondensatoren zwischen den einzelnen Stufen abzublocken.

Wechselspannungsverstärker

Die bisher besprochenen Opamp-Schaltungen waren Gleichspannungsverstärker. Natürlich können Opamps auch Wechselspannungen verstärken – innerhalb der Grenzen, die ihnen durch die Übergangsfrequenz und die Anstiegsgeschwindigkeit gesetzt sind. Bei Audioanwendungen wollen wir aber überhaupt keine Gleichspannungen verstärken – der Übertragungsbereich reicht von 20 Hz bis 20 kHz. Um den Übertragungsbereich solchermaßen einzuschränken, müssen wir nur ein paar Kondensatoren in die Schaltung einbauen (**Bild 3**). Wir werden ihren Wert später berechnen, aber zunächst wir wollen uns ihren Einfluss die Grenzfrequenzen ansehen. Die Grenzfrequenz ist diejenige Frequenz, bei der die Verstärkung (relativ zur Verstärkung im Übertragungsbereich) um 3 dB abgenommen hat.

Wir tendieren dazu, diesen Übertragungsbereich zunächst auf 20 Hz bis 20 kHz einzuschränken, aber wenn wir mehrere Verstärkerstufen in Reihe schalten, die alle für diesen Bereich ausgelegt sind, dann müssen wir die Dämpfungen der einzelnen Stufen addieren und haben es bei Filtern höherer Ordnung mit entsprechend steilen Flanken zu tun. Wegen der unvermeidlichen Toleranzen der verwendeten Bauteile liegen die Grenzfrequenzen dann leider nicht mehr an der Stelle, wo wir sie haben wollen.

Um es kurz zu machen: Mit Grenzfrequenzen von 20 Hz und 20 kHz in allen Stufen würden wir den Frequenzgang der Schaltung ruinieren, weshalb es besser ist, die Grenzfrequenzen der einzelnen Verstärkerstufen weit außerhalb des eigentlichen Übertragungsbereichs zu legen. Die eigentliche Begrenzung dieses Bereichs auf 20 Hz am unteren Ende und 20 kHz am oberen Ende erfolgt dann in der Eingangsstufe (möglichst mit einem LC-Filter noch vor dem ersten Halbleiter, um demodulierende HF-Störungen von lokalen Sendern zu vermeiden).

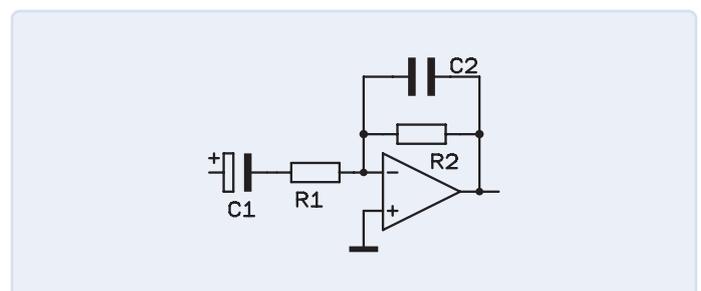


Bild 3. Begrenzung des Übertragungsbereichs.



Natürlich muss jeder selbst entscheiden, wo er diese Grenzfrequenzen letztendlich festlegt: Es hängt zum Beispiel auch von der Anzahl der in Reihe geschalteten Verstärkerstufen ab. In unserem Beispiel halten wir einen Faktor 3 als „Sicherheitszuschlag“ ein und wählen daher 6 Hz und 60 kHz. Unsere Verstärkerstufe muss um den Faktor 10 verstärken, daher nehmen wir für die externen Widerstände Werte von 10 kΩ und 100 kΩ.

Da es am invertierenden Eingang des Operationsverstärkers einen virtuellen Nullpunkt gibt, ist der Eingangswiderstand der Schaltung gleich dem Wert von R1, der mit C1 einen Hochpass bildet. Am -3dB-Punkt ist die Impedanz von C1 genau gleich dem Widerstandswert von R1. Daraus folgt:

$$C_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 6 \text{ Hz} \cdot 10 \text{ k}\Omega} = 2,65 \mu\text{F}$$

Der nächstliegende Wert ist 2,2 μF, womit die Grenzfrequenz bei 7,2 Hz liegt. Damit sind wir ausreichend weit von 20 Hz entfernt und brauchen uns um die untere Grenzfrequenz nicht weiter zu kümmern.

Der Wert des Kondensators C2 wird so gewählt, dass seine Impedanz bei der oberen Grenzfrequenz gleich dem Widerstandswert von R2 ist:

$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \text{ kHz} \cdot 100 \text{ k}\Omega} = 26,5 \text{ pF}$$

Auch hier können wir ohne weiteres einen Standardwert von 22 pF verwenden.

Offset-Probleme bei einem nicht-invertierenden Verstärker

Im Gegensatz zum invertierenden Verstärker hat der nichtinvertierende Verstärker in seiner Grundkonfiguration einen offenen Eingang, das heißt, seine Eingangsimpedanz ist gleich der (hohen) Eingangsimpedanz des Operationsverstärkers.

In der Messtechnik sind solche hochohmigen Eingänge oft erwünscht, in anderen Bereichen stören sie aber nur: Die Offsetströme verursachen einen entsprechend großen Gleichspannungs-Offset, und Einstrahlungen in die Eingänge verursachen enorme Störungen. Es ist daher unbedingt notwendig, einen Widerstand R3 vom offenen Eingang zur Masse zu legen, wie in **Bild 4** dargestellt. Um den Gleichspannungs-Offset zu minimieren, sollte R3 gleich der Parallelschaltung von R1 und R2 sein; wenn wir jedoch eher an einem hohen Eingangswiderstand interessiert sind, sollte R3 einen Wert von 100 kΩ bis 1 MΩ bei bipolaren Opamps und einen Wert von 1...10 MΩ bei Opamps mit FET-Eingängen haben.

Das war's für heute! Beim nächsten Mal werden wir (unter anderem) symmetrische Verstärker und den Summierverstärker besprechen. ◀

RG – 240031-02

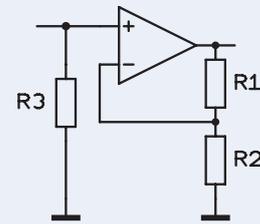


Bild 4. Eingangswiderstand für den nichtinvertierenden Verstärker.

Anmerkung der Redaktion: Diese Artikelserie „Aller Anfang...“ basiert auf dem Buch „Basiskurs Elektronik“ von Michael Ebner, das auf Deutsch und Niederländisch bei Elektor erschienen ist.

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

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



Passendes Produkt

- **B. Kainka, *Elektronik-Grundlagen und Einsteigerprojekte* (Elektor, 2019)**
Buch, kartoniert, deutsch: <https://www.elektor.de/products/elektronik-grundlagen-und-einsteiger-projekte>
E-Buch, PDF, deutsch: www.elektor.com/19036



Ein einfacher DDS-Signalgenerator

Direkte Digitale Synthese in
ihrer reinsten Form

Von Willem den Hollander (Schweiz)

Möchten Sie Ihren eigenen
Signalgenerator bauen? Hier finden
Sie Anleitungen und Tipps zum Bau
eines leistungsstarken und dennoch
einfachen Signalgenerators mit
einem AD9851. Der Artikel gibt
Auskunft über Modulmodifikation,
Funktionsweise und Software.

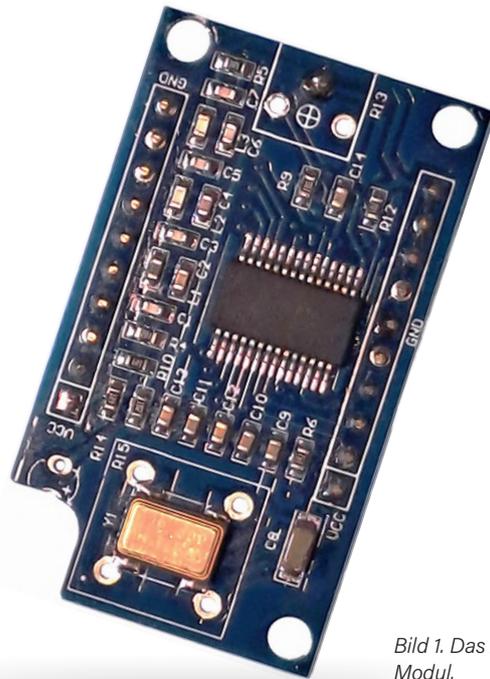


Bild 1. Das AD9851-Modul.

Analog Devices bietet eine Reihe von integrierten Schaltungen an, die komplette DDS-Signalgeneratoren enthalten. Diese ICs können aber nicht ganz allein arbeiten, sondern benötigen ein Tiefpassfilter und ein Steuergerät zur Initialisierung und Einstellung der gewünschten Ausgangsfrequenz. Bei AliExpress [1] werden komplette, sehr preiswerte Module angeboten, die den DDS-Chip zusammen mit besagtem Filter und einigen anderen Bauteilen enthalten. In dem kleinen Signalgenerator, der hier beschrieben wird, kommt ein Modul mit einem AD9851 zum Einsatz. Das Modul kann ein Sinussignal mit einer Frequenz zwischen 1 Hz und 70 MHz erzeugen. Auf dem Chip ist ein Komparator

integriert, der das Sinus-Ausgangssignal mit einer einstellbaren Gleichspannung vergleicht und daraus eine Rechteckwelle mit einstellbarem Tastverhältnis erzeugt. Fügt man zu diesem Modul einen kleinen Mikrocontroller, einen Drehgeber und eine Anzeige hinzu, entsteht ein vollständiger Signalgenerator.

Was sich dahinter verbirgt

Die Signalerzeugung erfolgt durch direkte digitale Synthese (DDS). Sie verwendet einen numerisch gesteuerten Oszillator (NCO) und eine Umsetzungstabelle (Lookup Table, LUT),

um eine digitale Sinuswelle zu erzeugen. Letztere wird mit einem Digital-Analog-Wandler (DAC) in eine analoge Form umgewandelt. Das Datenblatt des AD9851 [2] enthält zu diesem Thema genauere Informationen. **Bild 1** zeigt das Modul mit dem AD9851. Damit es in das vorgesehene Gehäuse passt, wurde eine LED entfernt und eine Ecke des Moduls abgeschnitten. Das Trimpoti zur Einstellung der Eingangsgleichspannung des Komparators wurde ebenfalls entfernt, da es nicht benötigt wurde: Diese Gleichspannung wird nämlich von einem DAC im Mikrocontroller erzeugt, der zur Steuerung des Moduls verwendet wird.

Der AD9851 kann entweder in einem parallelen oder einem seriellen Modus gesteuert werden. Da der serielle Modus nur vier Anschlüsse benötigt und der parallele Modus mehr als doppelt so viele, haben wir uns für den seriellen Modus entschieden, in dem das Modul initialisiert und die Frequenz gewählt wird. Die Serial-Load-Signale, wie sie im Datenblatt genannt werden, sind in **Bild 2** dargestellt. Das vierte Signal setzt das Gerät

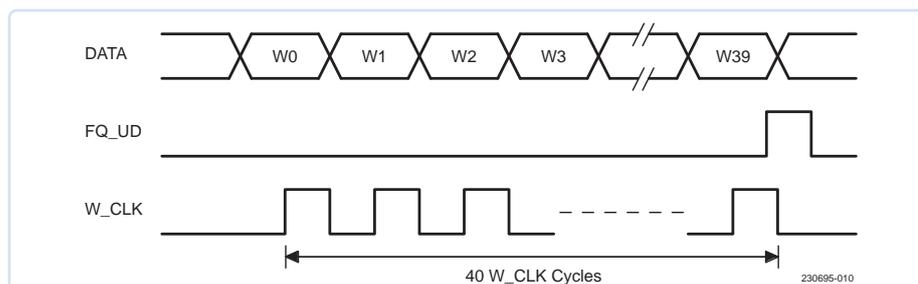


Bild 2. Serial-Load-Signale. (Quelle: AD9851-Datenblatt [2])

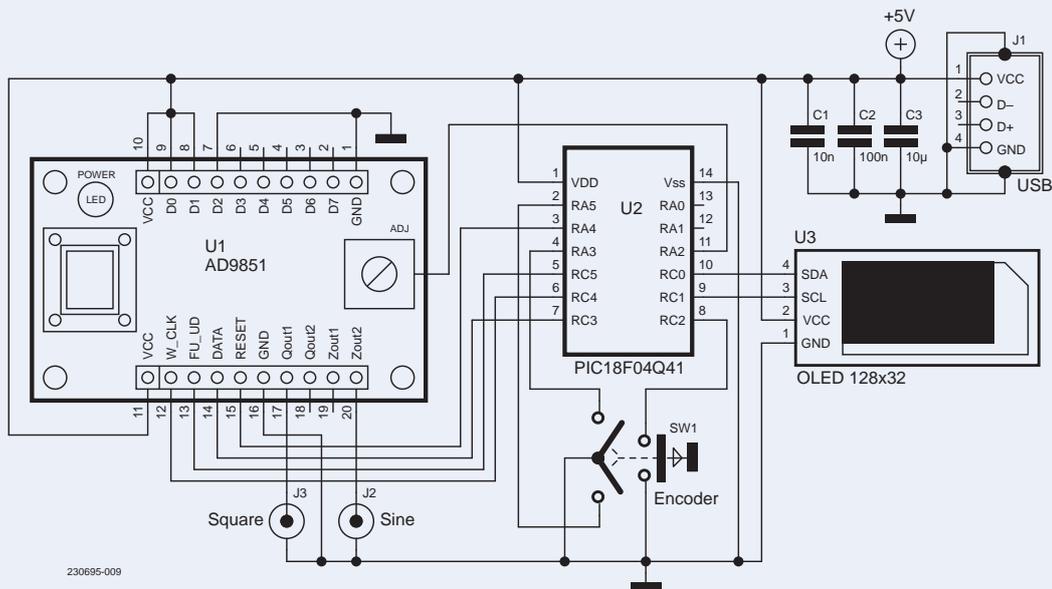


Bild 3. Schaltbild des DDS-Signalgenerators.

zurück, um es zu initialisieren. Ein Mikrocontroller liefert diese Signale über seine integrierte SPI-Peripherie. Da die Frequenz variabel sein soll, wird ein Drehgeber verwendet, mit dem der Benutzer die Frequenz ändern kann. Ein kleines Display zeigt Informationen über die aktuell gewählte Frequenz an. Man sollte sich der Tatsache bewusst sein, dass ein DDS-Signalgenerator keine reinen Sinussignale erzeugt - das Ausgangssignal enthält mehrere Oberwellen der Abtastfrequenz.

Ein Blick auf die Schaltung

In Bild 3 ist der Schaltplan zu sehen. Da nur wenige I/Os benötigt werden, wird der 14-polige Mikrocontroller PIC18F04Q41 von Microchip verwendet. Er steuert das DDS-Modul mit vier Ausgängen, liest den Drehgeber mit drei Eingängen aus und steuert das Display über den I²C-Bus an, wofür zwei weitere Ausgänge benötigt werden. Die Ausgangsgleichspannung für den Komparator

des Moduls und somit zur Einstellung des Tastverhältnisses wird an Pin 11 erzeugt. Bleiben noch Pin 1 und Pin 14 für die Spannungsversorgung und Pin 12 und Pin 13 für die Programmierung. Der PIC18F04Q41 kann mit einem PICKIT 4, PICKIT 5, ICD 4, ICD 5 oder MPLAB Snap programmiert werden; ältere Versionen dieser Tools sind nicht kompatibel. Der Controller wurde in diesem Fall zwar vor der Montage auf die Platine programmiert; es ist jedoch möglich, ihn „on-board“ zu programmieren, indem man vorübergehend Drähte an die Prozessor-Pins lötet und sie nach der Programmierung wieder entfernt. Die 5-V-Versorgungsspannung wird über einen USB-Anschluss bereitgestellt. Der PIC18F04Q41 gehört zu einer neuen Reihe von PICs, bei der insbesondere die seriellen I/O-Module für SPI und I²C im Vergleich zu älteren Modellen verbessert wurden. Dies ist in dieser Anwendung sehr nützlich. Das SPI-Modul verfügt jetzt über ein gepuffertes

Ausgaberegister, das uns die Möglichkeit gibt, das erforderliche serielle 40-Bit-Ausgangssignal in einem einzigen kontinuierlichen Strom zu erzeugen. Für dieses serielle Signal wird ein Takt von 16 MHz verwendet, so dass eine Änderung der Ausgangsfrequenz des Generators weniger als 3 µs in Anspruch nimmt. Außerdem ist das I²C-Modul einfacher einzurichten als bei den älteren PICs. Die aktuelle Frequenz des erzeugten Signals wird auf einem kleinen OLED-Display (0,91") angezeigt, das über einen I²C-Bus mit einer Taktfrequenz von 400 kHz angesteuert wird.

Wie man die Einstellungen ändert

Durch Drücken des Encoder-Knopfes wird ein Unterstrich-Cursor von links nach rechts bewegt, der bei Erreichen der äußersten rechten Stelle wieder nach links zurückkehrt. Durch Drehen des Drehgeber-Knopfes wird die Zahl über dem Cursor erhöht oder verringert.

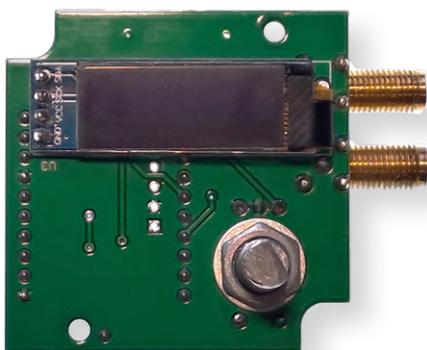


Bild 4a. Die Vorderseite der Platine mit dem Display.

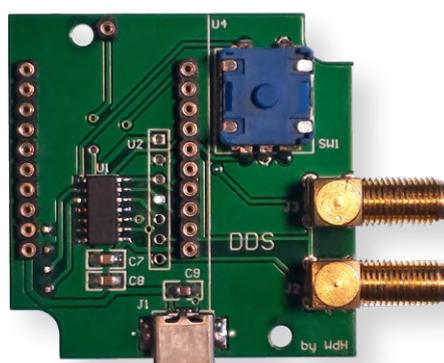


Bild 4b. Die Rückseite der Platine, ohne DDS-Modul.

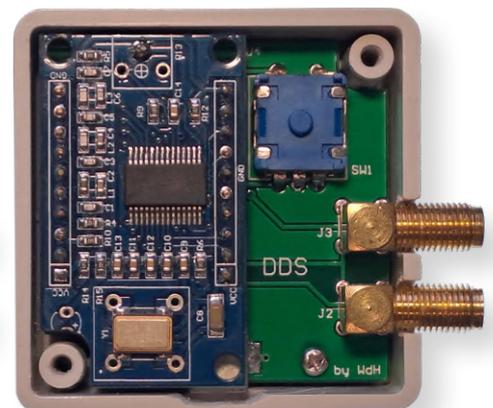


Bild 4c. Die Rückseite der Leiterplatte mit eingebautem DDS-Modul.



Stückliste

Kondensatoren:

(alle SMD, 0805)

C1 = 10 n

C2 = 100 n

C3 = 10 µ

Halbleiter:

U1 = AD9851-Modul

U2 = PIC18F04Q41-I/SL

U3 = OLED-Anzeige (0,91", 128×32)

Außerdem:

SW1 = Drehgeber mit Knopf

J1 = Mini-USB-Anschluss

J2, J3 = SMA-Buchse, 90°

Gehäuse = Strapubox 1551RGY

Platine

Auf diese Weise lässt sich der gesamte Bereich von 1 Hz bis 70 MHz schnell und bequem abdecken. Jede Änderung der angezeigten Zahl bewirkt eine Meldung an das DDS-Modul, um die Ausgangsfrequenz entsprechend anzupassen.

Wie bereits erwähnt, wird die Gleichspannung für den Komparatoreingang auf dem Modul von einem DAC im Mikrocontroller erzeugt. Diese Spannung kann geändert werden, indem der Schalter des Encoders etwa zwei Sekunden lang gedrückt wird, bis das Display eine dreistellige Zahl anzeigt. Wenn dies der Fall ist, kann die Spannung durch Drehen des Encoders in 256 Schritten auf das gewünschte Tastverhältnis der Rechteckwelle eingestellt werden. Wenn Sie den Drehknopf erneut länger als zwei Sekunden drücken, kehrt die Anzeige zur Frequenzanzeige zurück. Der Wert der gewählten Gleichspannung wird im internen EEPROM des PIC gespeichert.

Die Konstruktion

Die Schaltung besteht aus nur wenigen Komponenten. Es wurde eine kleine Platine angefertigt, die samt Bauteilen und Modul in einem kleinen Strapubox-Gehäuse mit den Abmessungen 50×50×20 mm³ Platz findet. Zwei SMA-Steckverbinder dienen als Ausgänge, da der Platz für BNC-Buchsen nicht ausgereicht hätte. Wie in den **Bildern 4a...c** zu sehen, wurden die Anschlussstifte des

Encoders um 180° gebogen, damit sie auf die Platine gelötet werden können. Dabei muss man vorsichtig vorgehen, da sie leicht brechen. Eine der Befestigungsschrauben, mit denen die Platine am Gehäuse befestigt wird, wird durch das DDS-Modul verdeckt. Deshalb wurde letzteres steckbar gemacht. Doch dabei stoßen wir auf ein Platzproblem: Das Gehäuse ist nur 20 mm hoch. Mit Ultra-Low-Profile-Buchsen und den dazugehörigen Low-Profile-Stiften konnte die erlaubte Höhe gerade noch so eingehalten werden. Der Mikrocontroller ist ausschließlich in einem SMD-Gehäuse erhältlich. Die drei Kondensatoren und der USB-Anschluss sind ebenfalls SMDs, was das Layout sehr einfach machte.

Die Firmware

Die Firmware [3] wurde in Assembler geschrieben und belegt nur 13 % des Programmspeichers des Controllers. Zunächst werden die Ports eingerichtet und dann zwei konfigurierbare Logikzellen (CLCs) als Flipflops gesetzt, die jede positive Transiente erkennen, die durch das Drehen des Drehgebers verursacht wird. Danach wird Timer2 so konfiguriert, dass er eine Verzögerung von 10 ms für die Entprellung des Schalters liefert, und Timer4 so, dass er eine Verzögerung von etwa 100 ms einstellt. Letzteres Pauschen ist nach der Initialisierung des OLED-Displays erforderlich. Nach der Einrichtung des DACs, der die Gleichspannung für den Komparator erzeugt, wird das I²C-Busmodul für die Kommunikation mit dem OLED-Display bei einer Taktfrequenz von 400 kHz konfiguriert, und schließlich kommt das SPI-Modul, das das DDS-Modul steuert, an die Reihe. Danach werden das Display, das DDS-Modul und die Interrupts initialisiert. Alles ist vollständig interruptgesteuert. Das Hauptprogramm besteht ausschließlich aus NOPs, in denen der Controller auf Interrupts wartet. Die Interrupt-Service-Routine des Schalters bewegt den Cursor nach rechts. Wenn der Schalter länger gedrückt wird, wird der Ausgangswert des DAC wie oben beschrieben angezeigt. Wenn das Flip-Flop des zweiten CLC seinen Zustand ändert, wird die zweite Interrupt-Service-Routine ausgeführt.

Der Ausgangsstatus des CLC zeigt an, ob der angezeigte Frequenzwert inkrementiert oder dekrementiert werden muss. Nach der Anzeige des neuen Wertes werden die Steuerbytes für das DDS-Modul berechnet und übertragen, und der Controller beginnt, auf den nächsten Interrupt zu warten. Ein bequemes Dasein! ◀

RG — 230695-02

Über den Autor

Willem den Hollander begeistert sich seit seinem 12. Lebensjahr für Elektronik. Er hat einen Master-Abschluss in Elektrotechnik und arbeitete 37 Jahre lang in der Forschung und Entwicklung im Bereich der Unterhaltungselektronik. Seine Lieblingsthemen sind Netzteile, digitale Schaltungen, programmierbare Logik und Mikroprozessoren. Mehrere seiner Projekte wurden in Elektor veröffentlicht.

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Wenden Sie sich bitte an den Autor unter wdenhollander@solnet.ch oder an die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.



Passende Produkte

> **OWON AG051 Arbiträrer Wellenformgenerator (5 MHz)**
www.elektor.de/18874

> **FNIRSI DPOX180H (2-in-1) 2-Kanal Digitales Phosphor-Oszilloskop (180 MHz) und Signalgenerator**
www.elektor.de/20640

WEBLINKS

[1] AliExpress: <https://aliexpress.com>

[2] Datenblatt AD9851: <https://analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9851.pdf>

[3] Firmware-Download auf der Projektseite: <https://elektormagazine.de/230695-02>

Jede Bewertung spiegelt ein persönliches Erlebnis wider

“Immer am Puls der Entwicklung und trotzdem stets in der Lage, die Dinge auch zu erklären. Für mich seit Jahrzehnten immer eine gute Anregung für eigene Projekte.”

★★★★★ by Peter Shimada

Rated 4.7 / 5 | 650 reviews

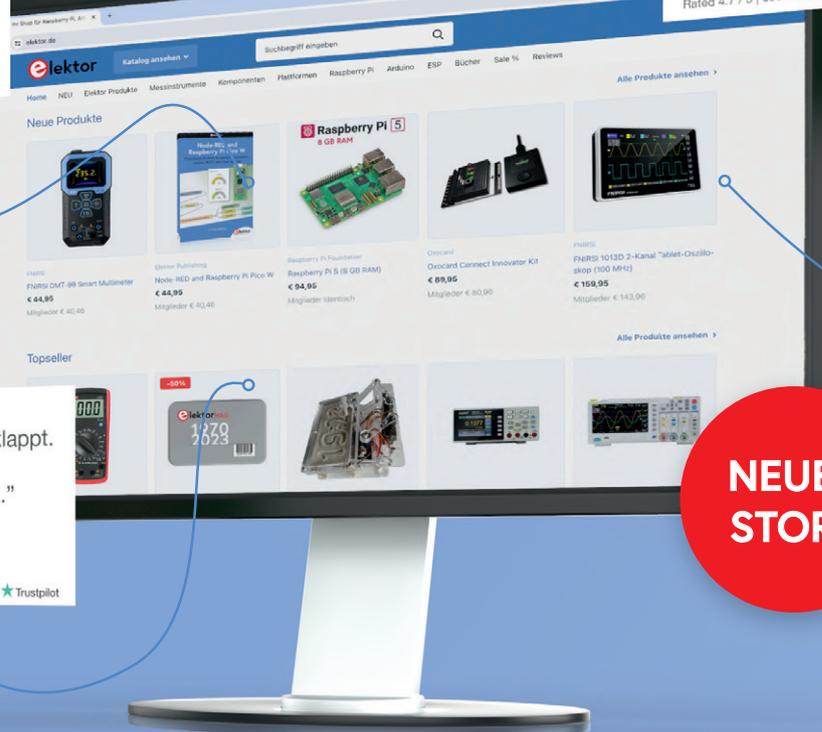
Trustpilot

“Alles Gut! – Alle Lieferungen sind stets sehr schnell und auch bei Problemen wird schnell reagiert und eine Lösung gefunden.”

★★★★★ by Darklirah Maledicta

Rated 4.7 / 5 | 650 reviews

Trustpilot



“Bestellung hat alles prima geklappt. Schneller Service. Buch wie beschrieben und zu empfehlen.”

★★★★★ by Matty

Rated 4.7 / 5 | 650 reviews

Trustpilot

NEUER
STORE

Wir lieben Elektronik und Projekte, und wir setzen alles daran, die Bedürfnisse unserer Kunden zu erfüllen

Der Elektor-Store: ‘Never expensive, always surprising’



Sehen Sie sich weitere Bewertungen auf unserer Trustpilot-Seite an: www.elektor.com/TP/de

Oder bilden Sie sich selbst eine Meinung und besuchen Sie unseren Elektor Store, www.elektor.de



elektor
design > share > earn

Sparkplug im Überblick

Eine Spezifikation für MQTT-Daten

Quelle: Adobe Stock

Von Tam Hanna (Ungarn)

Das beliebte MQTT-Protokoll ist einer der niederstschwelligen Wege zur Verbindung von verteilter Elektronik wie Sensoren, Controllern und Datenspeichern. Sofern die übertragenden Messages den (laxen) Regeln des Standards folgen und der Broker korrekt ansprechbar ist, funktioniert der Datenaustausch. Ein neues Protokoll namens Sparkplug versucht, mit einer zusätzlichen Ebene auch die Nutzdaten zu formalisieren, was unter anderem das Anbieten von Hilfsdiensten und das Erzeugen eines diversen Ökosystems erleichtert. Hier ein erster Einblick - wie immer anhand von praktischen Beispielen.

Das auf TCP/IP aufsetzende MQTT-Protokoll [1] ist im Internet der Dinge zu einer Art Standard geworden. Es ist leichtgewichtig, flexibel und recht einfach zu verstehen. Darüber hinaus kann MQTT auch sehr gut mit Netzteilnehmern umgehen, die nur ab und zu aktiv beziehungsweise erreichbar sind. MQTT stellt aber nur eine zuverlässige Kommunikation sicher - die Organisation der Nutzdaten selbst bleibt jedem Entwickler selbst überlassen.

Darüber hinaus bot MQTT lange Zeit nur eine rudimentäre Authentifizierung, die Verwaltung der verbundenen Geräte setzte (bis auf das Ausspeien eines *Last Wills* [2]) Entwickler-Mitarbeit oder die Nutzung eines zweiten Diensts voraus. Aufgrund des Fehlens einer Standardisierung kam hinzu, dass diese Arbeit von jedem Entwickler und im schlimmsten Fall für jedes Projekt neu bewerkstelligt werden musste. Das neue Protokoll namens Sparkplug presst die über MQTT übertragenen Nutzdaten nun in ein Schema, was unterm Strich für eine organisierte und verwaltbare Struktur sorgt.

In diesem Artikel wollen wir uns die Grundbegriffe ansehen und auch erste praktische Experimente mit der noch in einem frühen Zustand befindlichen Technologie durchführen.

Standard-Dokument bitte mitlesen!

Schon aus Platzgründen kann dieser Fachartikel keine vollständige Beschreibung von Sparkplug liefern. Die Spezifikation des Protokolls in Version 3.0 ist allerdings gut geschrieben. Es ist deshalb empfehlenswert, das gut 140 Seiten lange PDF-Dokument zur Hand zu haben [3] - im Artikel finden sich immer wieder Querverweise auf „Sektoren“, in denen sich Hintergrund-Informationen finden lassen.

Erster Überblick

Die einst von Cirrus Link ins Leben gerufene Sparkplug-Spezifikation [3] wird seit einiger Zeit von der Eclipse Foundation verwaltet, die sich im IoT-Bereich seit längerer Zeit als „Hansdampf in allen Gassen“ zu positionieren sucht.

Die zweite Version des Standards führte die Nutzung der *Google Protocol Buffers* [4] als Container-Datenformat ein. Die hier in diesem Artikel ausschließlich verwendete Sparkplug-Version 3.0 legte den Fokus auf das Eindeutigermachen der in der Spezifikation festgelegten Parameter. Zum Verständnis eines Sparkplug-Systems wollen wir uns das



Übersichtsdiagramm in **Bild 1** zu Gemüte führen, das einen IoT-Verbund illustriert.

Ganz analog zu einem klassischen MQTT-Verbund sehen wir in der Mitte einen MQTT-Server. Angemerkt sei, dass es sich dabei im Allgemeinen um einen gewöhnlichen MQTT-Server handelt. Die in der Basisvariante als *Sparkplug Compliant MQTT Server* bezeichneten MQTT-Implementierungen müssen laut der Spezifikation nur die folgenden vier, nicht sonderlich komplizierten Kriterien erfüllen:

- A Sparkplug conformant MQTT Server MUST support*
- ... publish and subscribe on QoS 0*
- ... publish and subscribe on QoS 1*
- ... all aspects of Will Messages including use of the retain flag and QoS 1*
- ... all aspects of the retain flag*

Sparkplug Aware MQTT Server sind dagegen fortgeschrittene Implementierungen, die Sparkplug-Verbünde durch *Value Added Intelligence* unterstützen. Was genau erforderlich ist, ist im Spezifikationsdokument im Sektion 12.66 aufgelistet.

Angemerkt sei, dass der Gutteil der in Bild 1 gezeigten Infrastruktur-

Komponenten für einen MQTT-Verbund nicht unbedingt notwendig ist; die grundlegende Variante besteht nur aus einem MQTT-Server und einem *Sparkplug Edge Node*, der in Form eines MQTT-Clients realisierbar ist.

Im Diagramm finden sich vertraute Elemente: *Edge Nodes* sind die Sensoren beziehungsweise Gegenstellen, die die zu verarbeitenden Informationen in Form von gemäß den Sparkplug-Regeln aufgebauten MQTT-Message in den Verbund einspeisen.

Als *Host Application* werden MQTT-Clients bezeichnet, die diese eingehenden Nachrichten konsumieren und zur Erfüllung eines Geschäftszwecks heranziehen. Die *Primary Host Application* ist insofern von Relevanz, als dass sie eine besonders enge Beziehung zu einzelnen Edge Nodes einght. Im Standard wird davon gesprochen, dass es sich dabei um eine Applikation handelt, deren Online- oder Offline-Sein das Verhalten des Edge Nodes beeinflusst.

Das nächste wichtige Element ist die in Sektor 4.1 im Detail beschriebene Message-Struktur. MQTT-Clients müssen sich beim Absetzen von Messages beim Zusammenbau der Topic-Infrastruktur an folgenden Aufbau halten:

`namespace/group_id/message_type/edge_node_id/[device_id]`

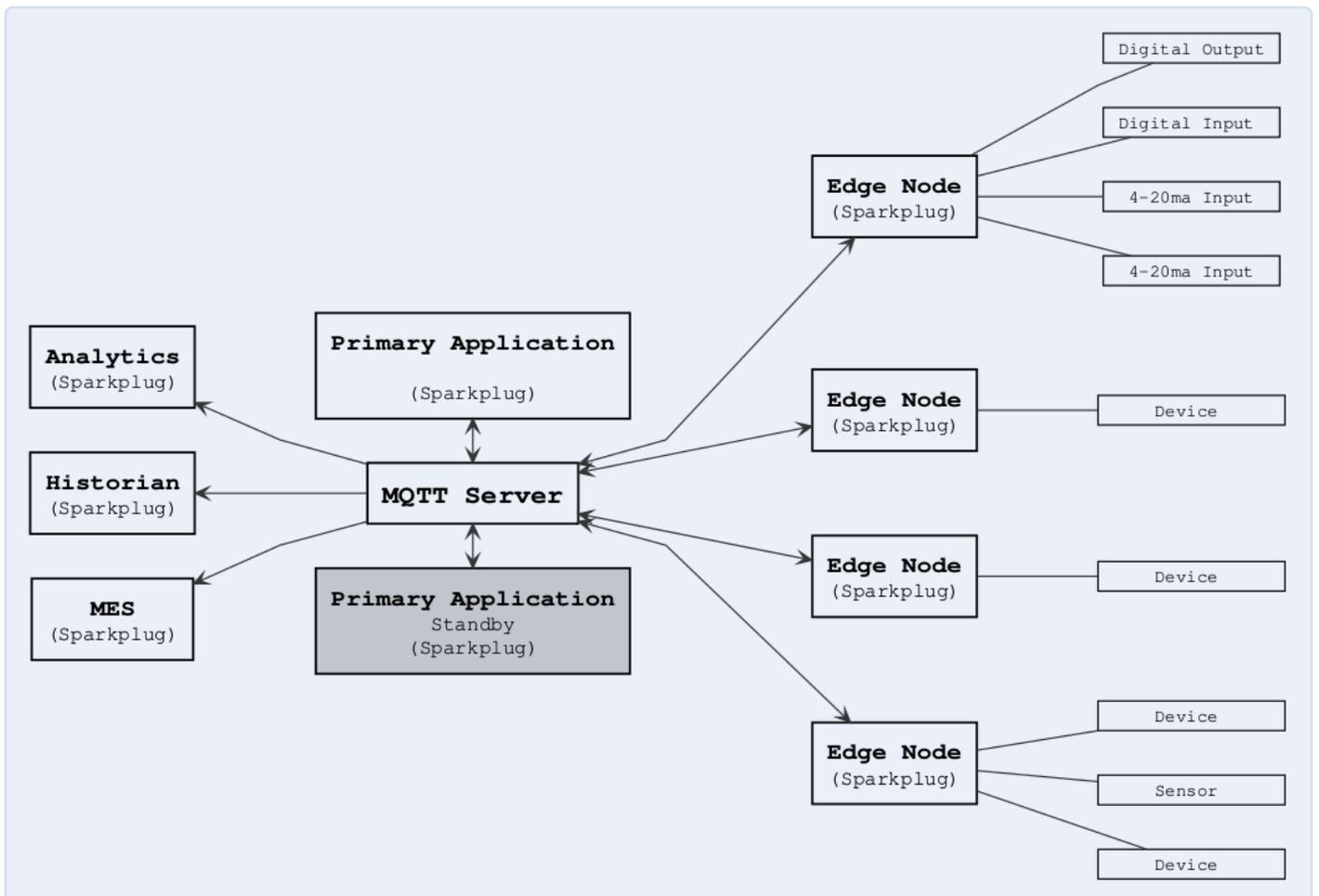


Bild 1. Diese Komponenten realisieren gemeinsam ein Sparkplug-System (Quelle: [3]).

- **NBIRTH** – Birth certificate for Sparkplug Edge Nodes
- **NDEATH** – Death certificate for Sparkplug Edge Nodes
- **DBIRTH** – Birth certificate for Devices
- **DDEATH** – Death certificate for Devices
- **NDATA** – Edge Node data message
- **DDATA** – Device data message
- **NCMD** – Edge Node command message
- **DCMD** – Device command message
- **STATE** – Sparkplug Host Application state message

Bild 2. Als Message-Type sind nur neun Varianten zulässig (Quelle: [3]).

`namespace` dient der „Verschlüsselung“ von Sparkplug-kompatiblen Kanälen, und muss immer „spBv1.0“ lauten. `group_id` beschreibt die Struktur - analog zum bei verschiedenen Cloud-Providern verwendeten `Tag` ist es eine Möglichkeit, um den Aufenthaltsort der einzelnen Nodes näher zu qualifizieren.

Wichtiger ist der `message_type`. Die Eclipse Foundation spezifiziert zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Artikels derer lediglich neun, die in **Bild 2** aufgelistet sind.

Die Attribute `edge_node_id`/`[device_id]` beschreiben, welches Endgerät und welche Unterendstelle für das eigentliche Absetzen der Message verantwortlich war.

Angemerkt sei, dass der MQTT-Standard mit diversen Sonderzeichen die Einrichtung von Filtern erlaubt. Es ist also problemlos möglich, beispielsweise alle zu einem bestimmten Typ gehörenden Messages als relevant anzumelden. Weitere Informationen hierzu finden sich beispielsweise in [5].

Analyse der Nachrichtenstruktur

Zweiter Faktor bei der Arbeit mit der Sparkplug-Spezifikation ist die in Bild 2 angerissene Rolle der einzelnen Messages. Da der Datenfluss in der Spezifikation durch (verwirrende) Zeit-Diagramme beschrieben ist, wollen wir versuchen, wichtige Messagetypen nach Rolle und Payload zu gruppieren. Möchten Sie sich die Diagramme dagegen selbst ansehen, so ist Sektor 5 der Spezifikation empfehlenswert.

Beginnen wir mit den Messages `DBIRTH` und `NBIRTH`. Erkennbar an der Namensgebung – Birth steht im englischen für Geburt - handelt es sich um Nachrichten, die das „Verfügbar-werden“ neuer Teile des Sparkplug-Verbunds anzeigen. `NBIRTH` kümmert sich dabei um das Auftauchen eines neuen Nodes, während `DBIRTH` das Auftauchen eines neuen Devices anzeigt.

Wichtig ist, dass die Messages als Payload eine Struktur anliefern müssen, die dem Empfänger das Erzeugen eines kompletten (gern als *Digital Twin* bezeichneten) digitalen Abbilds von allem ermöglichen, was in der neu hinzugekommenen Endstelle krecht und fleucht. Aus der Logik folgt dann, dass sowohl `NDEATH` als auch `DDEATH` für das Verschwinden von Endstellen verantwortlich sind.

`NDEATH`-Messages sind dabei für das Verschwinden eines Nodes verantwortlich, und werden vom MQTT-Server gesendet, wenn der Node verschwindet. Die Anmeldung erfolgt im Rahmen der `NBIRTH`-Message. Die für den Device-Death verantwortliche Message `DDEATH` wird stattdessen vom Node geschickt - wichtig ist daran, dass das Absenden ausschließliche Verantwortung des Nodes ist.

Die Messages `NDATA` und `DDATA` erlauben das Übertragen von Messwerten und das Senden von Befehlen, um den im Endgerät gehaltenen Status eines Attributs auf einen neuen Wert zu verschieben. Die Message `DDATA` ist insofern von Relevanz, weil sie das Konzept des *Report by Exception* einführt - in der Spezifikation liest man für dieses Verfahren gerne die Abkürzung *RBE*. Darunter versteht man in der Welt von Sparkplug, dass Zustands-Änderungen nur dann an den Host gesendet werden sollen, wenn eine „Exception“ beziehungsweise Änderung, die Aufmerksamkeit verdient, aufgetreten ist.

Die normalerweise verwendete Vorgehensweise, in der Spezifikation als *Time Based Reporting* bezeichnet, ist zwar ebenfalls erlaubt, wird explizit aber als wenig erwünscht bezeichnet:

„Again, time based reporting can be used instead of RBE but is discouraged and typically unnecessary.“

Payload: Google Protocol Buffers

Wer sich mit Low-Level-Programmierung auseinandergesetzt hat, kann über die Probleme mit der Serialisierung von Datenstrukturen Lieder singen. Google bietet mit *Protocol Buffers* eine konzeptuell an JSON und Co. angelehnte Standardisierung an, die das Erzeugen von „Plattform-unabhängigen serialisierbaren Containern“ erleichtert. Wohl auch ob der immens breiten Unterstützung von Protocol Buffers, für die es mittlerweile in so gut wie jeder Programmiersprache brauchbare Bibliotheken gibt, setzt die Sparkplug-Spezifikation als Payload auf ebendiese. Die Homepage der Protocol Buffers ist für ernsthaft an Sparkplug interessierte Entwickler mehr als lesenswert [4].

Angemerkt sei, dass die Protocol Buffers ein binäres Protokoll darstellen. In der Praxis, aber auch im Spezifikations-Dokument, sieht man allerdings häufig nach dem folgenden Schema aufgebaute JSON-Annotationen:

```
{
  "timestamp": <timestamp>,
  "metrics": [{
    "name": <metric_name>,
    "alias": <alias>,
    "timestamp": <timestamp>,
    "dataType": <datatype>,
    "value": <value>
  }],
  "seq": <sequence_number>
}
```

Dabei handelt es sich um ein aus den Binärdaten rehydriertes Format, das mit den physisch über den Äther geschickten Informationen nichts gemein hat. Im Prinzip zeigt uns das hier gezeigte Snippet aber alles, was in einer Sparkplug-Message zu erwarten ist.

Die `timestamp` muss in OTC gehalten werden und ist ein 64-Bit-Integerwert, der die verstrichenen Millisekunden seit der Unix-Epoche beschreibt. Das `metrics`-Feld, das hier „einwertig“ ausgeführt ist, enthält dann die eigentlichen in der Message zu übertragene Nutzdaten.

Zu guter Letzt gibt es dann noch eine Sequenznummer, die analog zu diversen anderen Protokollen bei der Integritäts-Sicherstellung der Datenübertragung hilft.



Eine vollständige Besprechung der in den verschiedenen Nachrichten übertragenen Datenfelder würde den Artikel sprengen und nur wenig Vorteil bringen. Möchten Sie eine „Low-Level-Implementierung“ von Hand durchführen, so empfiehlt sich Sektor 6 der Spezifikation. In der Praxis kommen meistens Bibliotheken zum Einsatz, die sich um die Bereitstellung kümmern.

In die Praxis!

Im Interesse der Real-Haltung der Spezifikation findet sich im offiziellen Spezifikationsdokument ein Hinweis darauf, dass ein Raspberry Pi unter Nutzung eines IO-Boards mehr oder weniger „offiziell“ Teil der Spezifikation ist und als Beispielimplementierung eines Sparkplug Edge Nodes dient. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Frage, was wir als Einlaufstelle der Daten beziehungsweise Implementierung der Host-Applikation (auf einem PC) heranziehen wollen.

Angemerkt sei, dass die Eclipse Foundation eine Liste kompatibler Implementierungen anbietet [6]. Wer dort ein Produkt listen möchte, muss einen Kompatibilitätstest durchlaufen (was den Rahmen dieses Artikels sprengen würde). Mit *Eclipse Tahu* [7] steht außerdem eine fast schlüsselfertige Wrapper-Bibliothek zur Verfügung, die die Bereitstellung der Pakete erleichtert.

Wir wollen in den folgenden Schritten auf *Ignition* von Inductive Automation setzen, eine der wenigen Implementierungen eines Sparkplug-Hosts.

Im Hintergrund ist ein Message-Broker erforderlich - der Autor arbeitet unter Ubuntu 20.04 LTS, weshalb wir Mosquitto in einem Docker-Container anwerfen wollen.

Hier ist eine Konfigurationsdatei erforderlich. Mosquitto führte in der Version 2.0.0 eine Absicherung der Konfiguration durch, weshalb ohne den hier gezeigten Eingriff kein Verbinden anonymer Clients zugelassen ist:

```
tamhan@TAMHAN18:~$ cat mosquitto.conf
allow_anonymous true
listener 1883
persistence true
persistence_location /mosquitto/data/
log_dest file /mosquitto/log/mosquitto.log
```

Der eigentliche Start erfolgt dann folgendermaßen:

```
tamhan@TAMHAN18:~$ docker run -it
-p 1883:1883 -p 9001:9001
-v $(pwd)/mosquitto.conf:/mosquitto/config/
mosquitto.conf eclipse-mosquitto
```

Nach dem Einrichten des MQTT-Brokers besuchen wir im nächsten Schritt die Seite [8], wo wir Ignition herunterladen. Die Software wird mit einem Installations-Assistenten ausgeliefert, dessen Aktivierung so erfolgt:

```
tamhan@TAMHAN18:~/Downloads$ chmod +x
ignition-8.1.25-linux-64-installer.run
tamhan@TAMHAN18:~/Downloads$
./ignition-8.1.25-linux-64-installer.run
```

Zu beachten ist, dass dieser Befehl den Mosquitto-Container nicht immer startet, während sich das System später in den systemd-Startprozess integriert. Kommt es zu seltsamem Verhalten, weil der Mosquitto-Server erst nach dem eigentlichen Plattform-Container gestartet wurde, so lässt sich dies durch folgende Befehlsfolge beheben:

```
tamhan@TAMHAN18:/usr/local/bin/ignition$
./ignition.sh stop
tamhan@TAMHAN18:/usr/local/bin/ignition$
./ignition.sh start
```

Im Rahmen der Installation wird das Superuser-Passwort abgefragt, um die Integration durchzuführen. In den folgenden Schritten entschied sich der Autor für das Installationsverzeichnis */usr/local/bin/ignition* - dies ist wichtig, weil sich dort das später für eine Deinstallation erforderliche Skript versteckt.

Im Bereich der Modul-Auswahl für Ignition sollten Sie im ersten Schritt die Option *Custom* auswählen, um im daraufhin erscheinenden Modul-Listenfenster alle Möglichkeiten zu markieren. Explizit wichtig ist unter anderem die Auswahl der Pakete *Web Browser* und *Web Dev*. Der Installationsassistent bietet nach getaner Arbeit an, die Plattform zu starten. Normalerweise funktioniert dies, was durch Ausgabe einer Erfolgsmeldung quittiert wird, die nach folgendem Schema aufgebaut ist:

```
INFO [IgnitionInstaller      ]
[2023/03/12 22:15:50]:
Gateway Address: http://localhost:8088
```

In manchen Fällen stürzt das System ab. In diesem Fall wechseln Sie nach folgendem Schema in das Installations-Verzeichnis, um von Hand einen zweiten Start des Produkts anzuweisen:

```
tamhan@TAMHAN18:/usr/local/bin/ignition$ ./ignition.sh
start
```

Sei dem wie es sei, müssen Sie im nächsten Schritt die URL des Ignition Gateways aufrufen und sich dort für die Installation der *Maker*-Edition entscheiden. Dabei handelt es sich um eine gering funktionseingeschränkte Variante des Produkts, die für nicht-kommerzielle Nutzer kostenlos ist.

Nach dem erfolgreichen Start - die Meldung *Ignition Gateway is starting* ist mitunter einige Zeit am Bildschirm zu sehen - wählen wir die Option *Enable QuickStart*, um die Plattform in einen „Schnellstart-bereiten“ Zustand zu überführen.

Das System ist intern voll modular aufgebaut. Aus diesem Grund entscheiden wir uns im ersten Schritt für die Option *Config Systems Modules*, um die Modul-Verwaltung zu aktivieren. Dann findet sich eine Gruppe schlüsselfertiger Archive [9] mit Modulen von Drittanbietern. Für die Nutzung des Sparkplug-Plattform benötigen wir die Elemente *MQTT Transmission* und *MQTT Engine*, die wir nacheinander unter Nutzung des Webinterfaces installieren.

Im nächsten Schritt wechseln wir in die Konfigurationsoption *Config Mqttengine MQTT Engine Settings*, wo wir, wie in **Bild 3** gezeigt, über das erfolgreiche Auffinden der im Docker-Container lebenden Mosquitto-Instanz in Kenntnis gesetzt werden.

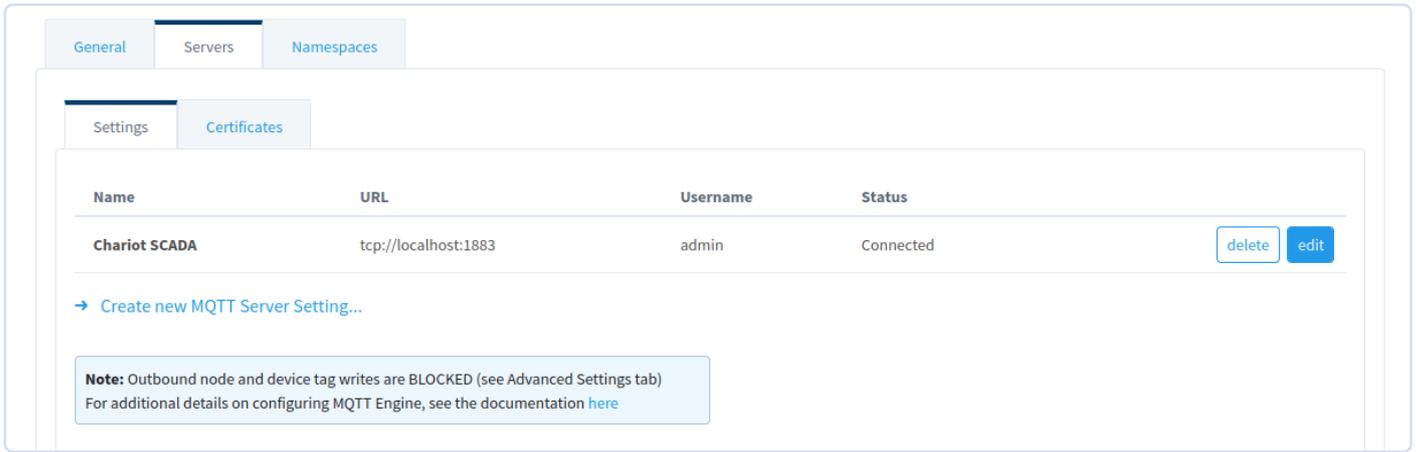


Bild 3. Die Mosquitto-Instanz wurde automatisch erkannt.

Außerdem gibt es unter der Rubrik *Config Mqtttransmission MQTT Transmission Settings* eine weitere Einstellung, deren Korrektheit ebenfalls überprüft werden muss. Im Interesse der Kompaktheit der Server-Plattform ist das System auch hier modular ausgelegt. Der Knopf *Get Designer* ermöglicht das Herunterladen einer separaten und als Designer bezeichneten Komponente, die das Parametrieren der in der Plattform lebenden Einstellungen erlaubt. Laden Sie das Archiv im ersten Schritt herunter und entpacken Sie es. Der eigentliche Start der Applikation erfolgt dann wie im Fall jeder anderen Kommandozeilen-Utility:

```
tamhan@TAMHAN18:~/designerlauncher/app$
./designerlauncher.sh
```

Die frisch gestartete Designer-Applikation muss im nächsten Schritt Kontakt aufnehmen. Hierzu entscheiden wir uns im ersten Schritt für die Option *Add Designer*, klicken danach die Option *Localhost* und fügen so einen neuen Plattform-Eintrag hinzu. Der Knopf *Open Designer* ermöglicht uns dann die Bearbeitung der Informationen. Im nächsten Schritt entscheiden wir uns für die Option *Sample-*

QuickStart und klicken auf *Open*, um das Start-Beispiel zu laden. Das Anklicken der Option *View Panels OPC Browser* öffnet dann ein weiteres Panel, in dem diverse OPC-Datenquellen zur Verfügung stehen. Expandieren Sie dort die Rubrik *Expand Devices*, um das Gerät *[Sample_Device]* einzublenden. Danach ist wie in **Bild 4** gezeigt eine Verschiebung (Drag-and-Drop) erforderlich.

Im nächsten Schritt müssen wir darauf achten, den Designer zu schließen und dabei durch Nutzung der Option *Save and Close* alle in der lokalen Applikation durchgeführten Änderungen zu speichern und hochzuladen. Danach können wir in das Web-Interface zurückkehren, wo wir über die Option *MQTT TRANSMISSION Settings Transmitters Create new Settings* eine neue Konfiguration einstellen. Wichtig ist danach, dass im Feld *Tag Provider* der Text *default* eingegeben wird - das Speichern der Änderungen aktualisiert den Systemzustand.

Im nächsten Schritt öffnen wir die Konsole der Workstation, wo wir den im Mosquitto-Paket enthaltenen Test-Subscriber aktivieren und mit dem Kanal *spBv1.0/#* verbinden. Wichtig ist hier eigentlich nur, dass das Symbol *#* die Rolle des sonst als *** dargestellten Wildcard-Symbols übernimmt:

```
tamhan@TAMHAN18:~$ mosquitto_sub
-h localhost -t spBv1.0/#
```

Lohn der Mühen ist das in **Bild 5** gezeigte Aufscheinen von Binärdateien.

Inbetriebnahme des Raspberry Pi

Im nächsten Schritt ist ein Prozessrechner erforderlich. Da die Spezifikation an mehreren Stellen auf den Raspberry Pi hinweist, wollen wir diesen in den folgenden Schritten verwenden. Der Autor nutzt einen Raspberry Pi 4 mit einer vergleichsweise aktuellen Version des Betriebssystems.

Für das eigentliche „Armieren“ der Komponenten ist die folgende Befehlsfolge erforderlich:

```
pi@raspberrypi:~/sparkspace $ git clone
https://github.com/eclipse/tahu.git
Cloning into 'tahu'...
...
pi@raspberrypi:~/sparkspace
$ cd tahu/java/examples/raspberry_pi
pi@raspberrypi:~/sparkspace/tahu/java/
examples/raspberry_pi $ mvn clean install
```

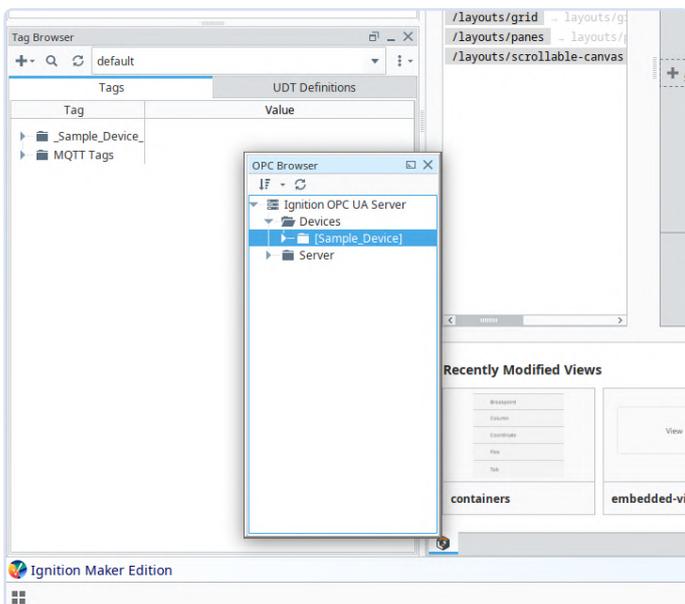


Bild 4. Drag-and-Drop in die Rubrik „default“ ist hilfreich.



Der von der Eclipse-Foundation zur Verfügung gestellte Beispielcode ist allein nicht funktionsfähig, sondern muss unter Nutzung der Maven-Paketverwaltung im ersten Schritt um die nötigen Abhängigkeiten und Bibliotheken erweitert werden.

Im nächsten Schritt ist die Datei `SparkplugRaspberryPiExample.java` von Interesse, die sich nach folgendem Schema in einem Editor öffnen lässt:

```
pi@raspberrypi:~/sparkspace/tahu/java/  
examples/raspberry_pi/src/main/java/  
org/eclipse/tahu $ pico SparkplugRaspberryPiExample.java
```

Der Beispielcode geht dabei davon aus, dass ein „externer“ MQTT-Broker für die eigentliche Verarbeitung der Informationen verantwortlich sein wird. In der Konfiguration der Workstations des Autors lautet seine IP-Adresse `192.168.1.68`, weshalb nach folgendem Schema eine Anpassung erforderlich ist:

```
public class SparkplugRaspberryPiExample  
implements MqttCallbackExtended {  
    private static final String  
        DFLT_MQTT_SERVER_HOST_NAME = "192.168.1.68";
```

Danach folgt ein abermaliger Aufruf von Maven, um die fehlenden Elemente herunterzuladen:

```
pi@raspberrypi:~/sparkspace/tahu/java/  
examples/raspberry_pi $ ls  
dependency-reduced-pom.xml pom.xml
```

```
src target THIRD-PARTY.txt  
pi@raspberrypi:~/sparkspace/tahu/java/  
examples/raspberry_pi $ mvn clean install
```

Sofern Sie auf Ihrem Raspberry Pi bereits eine Java-Version installiert haben, lässt sich das resultierende Programm nach folgendem Schema anwerfen:

```
pi@raspberrypi:~/sparkspace/tahu/java/  
examples/raspberry_pi/target $ java  
-jar example_raspberry_pi-1.0.1.jar
```

In den meisten Fällen kommt es an dieser Stelle zu einem Fehler, die auf die Bibliothek `libdio` hinweist. Dies ist für uns insofern unkritisch, da wir uns im nächsten Schritt nur der Struktur des Programms zuwenden und einige besonders interessante Aspekte näher ansehen wollen. Zuerst wenden wir uns der Berechnung der Sequenznummer zu, die nach folgendem Schema erfolgt:

```
// Used to get the sequence number  
private long getNextSeqNum() {  
    long retSeq = seq;  
    if (seq == 256) {  
        seq = 0;  
    } else {  
        seq++;  
    }  
    return retSeq;  
}
```

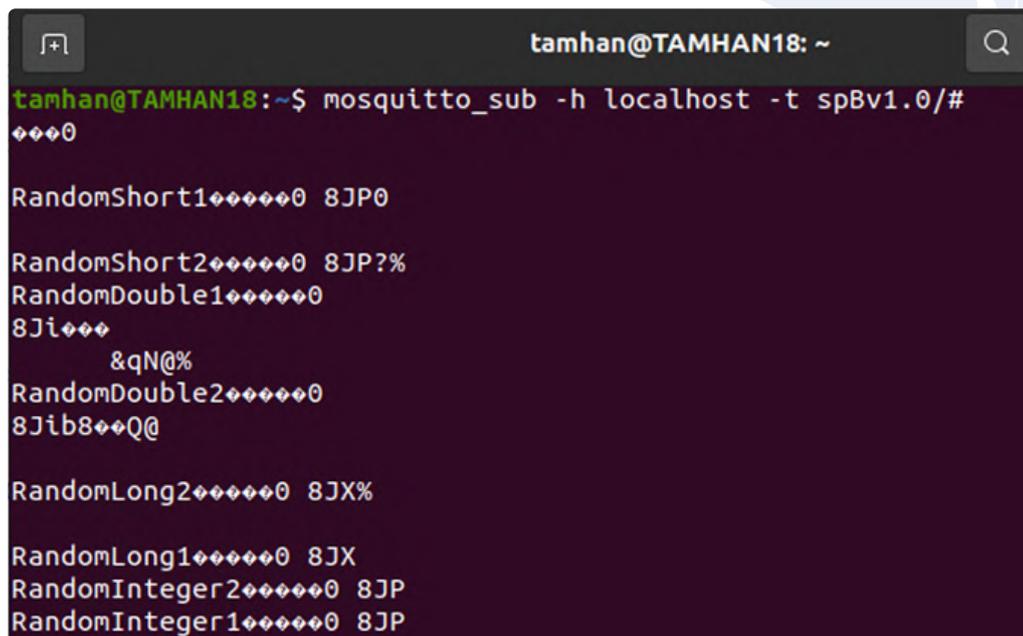


Bild 5. Die seltsamen Zeichen bedeuten: Hier sind Binärdaten.

Interessant ist außerdem die Art, wie die vom hier nicht verwendeten IO-Board angelieferten Informationen in ein für den Host verständliches Format verpackt werden. Der hierfür notwendige Code sieht folgendermaßen aus:

```
SparkplugBPayload payload =
    new SparkplugBPayloadBuilder(getNextSeqNum())
        .setTimestamp(new Date())
// Create an "Inputs" folder of process variables
.addMetric(new MetricBuilder
    (PibrellaInputPins.A.getPin().getDescription(),
    MetricDataType.Boolean,
    pibrella.getInput(PibrellaInputPins.A)
        .isHigh()).createMetric())
.addMetric(new MetricBuilder
    (PibrellaInputPins.B.getPin().getDescription(),
    MetricDataType.Boolean,
    pibrella.getInput(PibrellaInputPins.B)
        .isHigh()).createMetric())
. . .
.createPayload();

// Publish the Device BIRTH Certificate now
executor.execute(
    new Publisher(NAMESPACE + "/" +
        groupId + "/DBIRTH/" +
        edgeNode + "/" + deviceId, payload));
```

Das Entgegennehmen von Messages erfolgt dann im Allgemeinen analog unter Nutzung der Target-API:

```
public void messageArrived
    (String topic, MqttMessage message) throws Exception {
    System.out.println("Message Arrived on topic " + topic);

// Initialize the outbound payload if required.
SparkplugBPayloadBuilder outboundPayloadBuilder =
    new SparkplugBPayloadBuilder
        (getNextSeqNum()).setTimestamp(new Date());

String[] splitTopic = topic.split("/");
if (splitTopic[0].equals(NAMESPACE) &&
    splitTopic[1].equals(groupId) &&
    splitTopic[2].equals("NCMD") &&
    splitTopic[3].equals(edgeNode)) {

    SparkplugBPayload inboundPayload =
        new SparkplugBPayloadDecoder().
            buildFromByteArray(message.getPayload());
    . . .
```

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch noch, dass der Standard zur Verarbeitung umfangreicher Payloads befähigt ist. Ein schönes Beispiel dafür ist die folgende `for`-Schleife, die verschiedene angelieferte Befehls-Typen auf dem Raspberry Pi enumeriert:

```
SparkplugBPayload inboundPayload =
    new SparkplugBPayloadDecoder().
        buildFromByteArray(message.getPayload());

for (Metric metric : inboundPayload.getMetrics()) {
    System.out.println("Metric: " +
        metric.getName() + " :: " +
        metric.getValue());

    if (metric.getName().equals
        ("Node Control/Next Server")) {
        System.out.println("Received a Next Server command.");
    } else if (metric.getName().
        equals("Node Control/Rebirth")) {
        publishBirth();
    } else if (metric.getName().
        equals("Node Control/Reboot")) {
        System.out.println("Received a Reboot command.");
    } else if (metric.getName().
        equals("Node Control/Scan Rate ms")) {
        scanRateMs = (Integer) metric.getValue();
        if (scanRateMs < 100) {
            // Limit Scan Rate to a minimum of 100ms
            scanRateMs = 100;
        }
    }
}
```

Für die folgenden Schritte wollen wir allerdings auf ein etwas einfacheres Beispiel setzen, das unter `/home/pi/sparkspace/tahu/java/examples/simple/src/main/java/org/eclipse/tahu` bereitsteht. Öffnen Sie im ersten Schritt die Java-Datei, und passen Sie nach folgendem Schema zwei der dutzenden Membervariablen an:

```
public class SparkplugExample
    implements MqttCallbackExtended {

// HW/SW versions
. . .
    private String serverUrl =
        "tcp://192.168.1.68:1883";
    private long PUBLISH_PERIOD = 1000;
    // Publish period in milliseconds
```

Wie weiter oben gilt auch hier, dass der in der Variable `serverUrl` abgelegte Wert naturgemäß an die in ihrem Netzwerk vorherrschende Situation angepasst werden muss. Das Reduzieren von `PUBLISH_PERIOD` sorgt dann dafür, dass die Haupt-Applikation schneller mit Daten versorgt wird.

Nach dem Abspeichern der geänderten Datei ist es erforderlich, in das Projekt-Stammverzeichnis zurückzukehren und abermals über das Paket-Verwaltungswerkzeug Maven eine Kompilation zu befehlen:

```
pi@raspberrypi:~/sparkspace/tahu/java/
examples/simple $ mvn clean install
```

Der Wechsel in den Stammordner ist dabei vor allem deshalb erforderlich,



weil sich die Datei *pom.xml* dort befindet: Sie hat die Aufgabe, die Kompilation des Projekts als Ganzes zu steuern. Lohn der Mühen ist die Erzeugung einer *.jar*-Datei, die im Ordner `~/sparkspace/tahu/java/examples/simple/target` unterkommt. Die Aktivierung erfolgt dann nach folgendem Schema:

```
pi@raspberrypi:~/sparkspace/tahu/java/
examples/simple/target $ java
-jar example_simple-1.0.1.jar
```

Zum Abernten der Ergebnisse müssen Sie abermals in die Designer-Applikation wechseln, wo sich das Ergebnis wie in **Bild 6** gezeigt präsentiert.

Für Vergessliche: Zurücksetzen des Gateways

Hand aufs Herz: Das Passwort des Gateways kann man schon einmal vergessen. Erfreulicherweise ist das Beheben des Problems nicht schwierig. Wechseln Sie ins Installationsverzeichnis, und führen Sie die folgenden drei Kommandos aus:

```
tamhan@TAMHAN18:/usr/local/bin/ignition$
./gwcmd.sh --passwd
Password has been reset. Gateway needs to be restarted.
tamhan@TAMHAN18:/usr/local/bin/
ignition$ ./ignition.sh stop
Stopping Ignition-Gateway...
tamhan@TAMHAN18:/usr/local/bin/
ignition$ ./ignition.sh start
Starting Ignition-Gateway with systemd...
Waiting for Ignition-Gateway...
running: PID:382296
```

Nach dem Neustart des Gateways können Sie sich über die URL anmelden. Dem ersten Benutzer präsentiert das Gateway dann ein Fenster, in dem ein neuer Benutzername und das zugehörige Passwort für den Administrator-Account festgelegt werden darf.

Solides System

Mit Sparkplug schickt die Eclipse Foundation ein solides Ontologie-System ins Rennen, das zur Zähmung des im MQTT-Bereich zweifels-ohne anzutreffenden Wildwuchs gut geeignet scheint. Wie im Fall

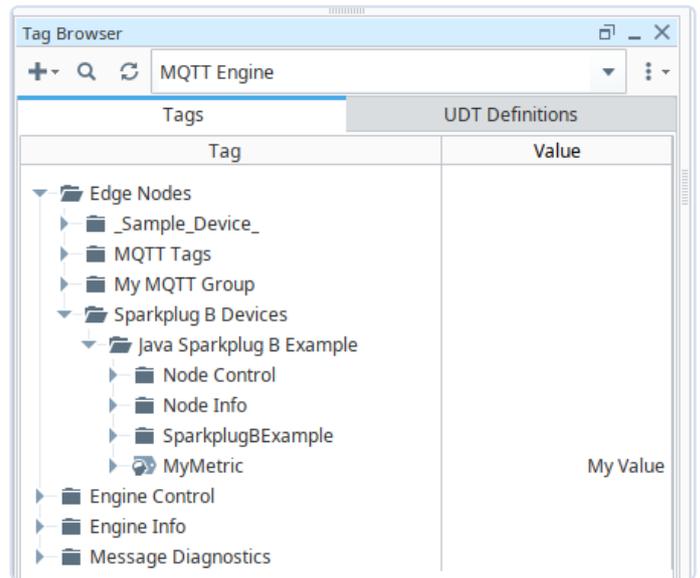


Bild 6. Achten Sie darauf, die Combobox korrekt einzustellen.

vieler andere Systeme gilt allerdings auch hier, dass der wahre Wert eines derartigen Standard erst dann sichtbar wird, wenn er in der Breite adoptiert wird. Am „Netzwerkeffekt-Gesetz“ führt nun mal kein Weg vorbei. ◀

230038-02

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Kommentare? Dann senden Sie eine E-Mail an den Autor unter tamhan@tamoggemon.com oder die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.

Über den Autor

Ingenieur Tam Hanna befasst sich seit mehr als 20 Jahren mit Elektronik, Computern und Software; er ist freiberuflicher Entwickler, Buchautor und Journalist (www.instagram.com/tam.hanna). In seiner Freizeit beschäftigt sich Tam unter anderem mit 3D-Druck und dem Vertrieb von Zigarren.

WEBLINKS

- [1] MQTT Grundlagen: <https://www.hivemq.com/mqtt/>
- [2] MQTT: Last Will: <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-9-last-will-and-testament/>
- [3] Standard-Dokument: <https://sparkplug.eclipse.org/specification/version/3.0/documents/sparkplug-specification-3.0.0.pdf>
- [4] Google Protocol Buffers: <https://developers.google.com/protocol-buffers/>
- [5] MQTT: Topics: <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-5-mqtt-topics-best-practices/>
- [6] Sparkplug Software: <https://sparkplug.eclipse.org/compatibility/compatible-software/>
- [7] Eclipse Tahu: <https://github.com/eclipse/tahu>
- [8] Inductive Automation Ignition herunterladen: <https://inductiveautomation.com/downloads>
- [9] Module von Drittanbietern: <https://inductiveautomation.com/downloads/third-party-modules/8.0.17>

Bemerkenswerte Bauteile

Zeile für Zeile: CRTCs

Von David Ashton (Australien)

In den 80er Jahren war es eine Herkulesaufgabe, Text auf Bildschirmen darzustellen, weit entfernt von der Mühelosigkeit heutiger Plug-and-Play-Lösungen. Ehren Sie diejenigen, die sich mit Kathodenstrahlröhren-Controllern (CRTCs) abmühen mussten, die unbesungenen Helden der frühen Computertechnik!



Bild 1. Das CRTC-IC Intel 8275. (Quelle: Jameco Electronics)

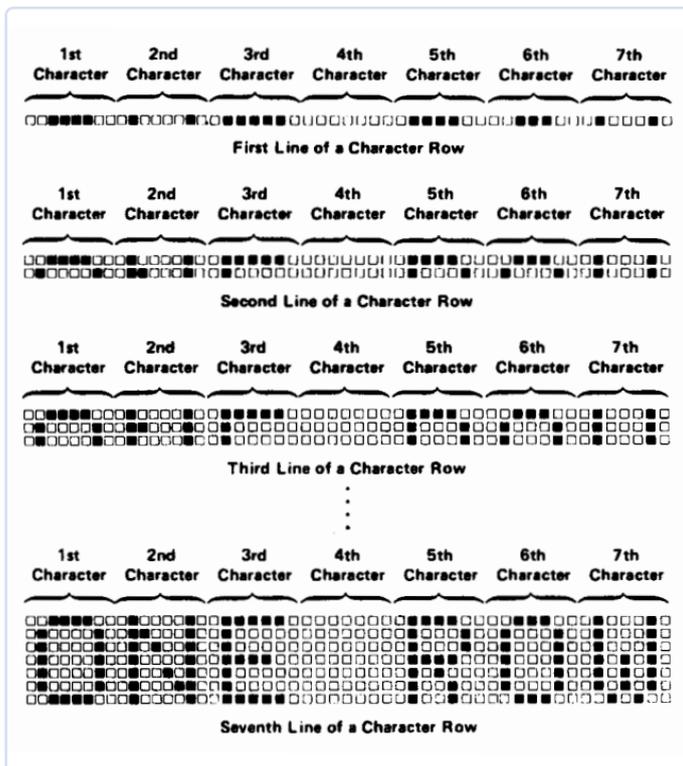


Bild 2. Aufbau von Text aus Pixelzeilen - hier mit einer 5x7-Zeichenmatrix. (Quelle: Intel)

Heutzutage ist die Anzeige von Text oder sogar Grafiken oder Videos durch einen Mikrocontroller... nun, vielleicht nicht gerade ein Kinderspiel, aber auch nicht allzu schwierig. Sie können eines der allgegenwärtigen LCD-Text- oder Grafikdisplays verwenden, oder, wenn Ihr Mikrocontroller wie ein Raspberry Pi etwas erhöhten Ansprüchen genügt, einfach einen HDMI-Monitor einstecken. Und es gibt fertige Softwarebibliotheken, mit denen Sie die gewünschten Inhalte ganz einfach anzeigen können.

Denken Sie aber an die Mikroprozessorentwickler der 80er Jahre. LCD-Bildschirme waren noch primitiv und nur für Taschenrechner geeignet, und Displays waren auf LED-Technik oder vielleicht auf ein paar Siebensegmentanzeigen beschränkt, die gemultiplext wurden, um nicht zu viele wertvolle I/O-Leitungen dafür gebrauchen zu müssen. Röhrenmonitore waren zwar verfügbar, aber wie konnte man all diese Videosignale mit ihren präzisen Timings und Pegeln erzeugen?

Das war Aufgabe der CRTC, der Kathodenstrahlröhren-Controller, Peripheriechips mit in der Regel 40 Pins (**Bild 1**), die von den großen Mikroprozessorherstellern angeboten wurden, um die Ausgabe von Text auf Röhrenmonitoren zu erleichtern. Bei Röhrenmonitoren müssen die Pixeldaten zeilenweise auf die Mattscheibe geschrieben werden, wobei ein Bild normalerweise bis zu 600 Zeilen erfordert. Bei einem Fernsehsignal würde die Zeile unterschiedliche Helligkeitsstufen haben, aber bei der Textanzeige waren die Stufen entweder high (Anzeige eines Punktes) oder low (kein Punkt). Auf diese Weise konnten Muster von Punkten angezeigt werden, die für uns Menschen lesbare Zeichen und Symbole bildeten – siehe **Bild 2**. Diese Chips wurden mit einem Zeichengenerator-ROM (CG-ROM) verwendet. Diese hatten in der Regel sieben Zeichenadresszeilen,

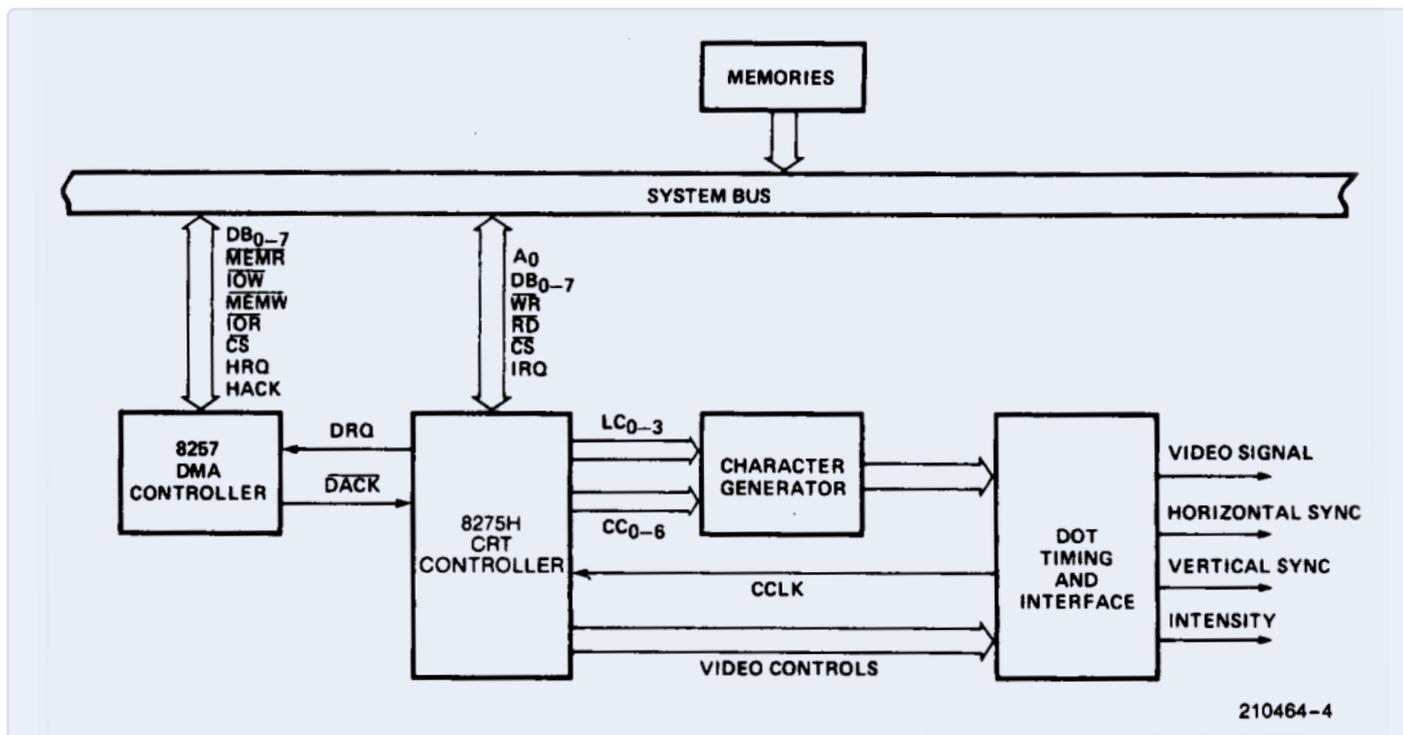


Bild 3. Ein typisches CRTC-System. (Quelle: Intel)

die durch den ASCII-Code für das zu erzeugende Zeichen angesteuert wurden, und gaben für jeden ASCII-Code das Pixelmuster für dieses Zeichen aus, das als Zeilen und Spalten gespeichert wurde. Übliche Zeichenformate waren 5×7 Punkte und 7×9 Punkte, wenn eine bessere Auflösung gefragt war. Der CRTC wählt die benötigte Zeile eines Zeichens mit Hilfe mehrerer Adresszeilen (Line Count genannt) aus.

Aufbau von Zeichen, Zeile für Zeile

Der CRTC adressiert das CG-ROM mit dem Code für das erste Zeichen (Zeilenadresse 1), um die oberste Pixelreihe für dieses Zeichen zu erhalten. Dann ändert er die Adresse auf die des zweiten Zeichens und ruft die oberste Pixelreihe für dieses Zeichen ab, und so weiter bis zum Ende der Zeile. Dann ändert der CRTC die Zeilen-zähladresse auf 2 und wiederholt den Vorgang für die zweite Pixelreihe. Die ganze Zeit über wurden die CG-Pixel in serieller Form an den Monitor gesendet und auf diese Weise eine komplette Zeile von Zeichen auf dem Monitor ausgegeben. Dann wurde eine neue Zeichenreihe in den Speicher des CRTC geladen und der ganze Vorgang für eine weitere Zeichenreihe wiederholt. Es konnten bis zu 80 Zeichen × 64 Zeilen programmiert werden. Der CRTC erzeugte auch die horizontalen und vertikalen Synchronsignale. Die meisten CRTCs verfügten nur über Speicherplatz für zwei Zeilen mit Zeichencodes. Während die eine verarbeitet wurde, wurde die andere geladen. In der Regel wurde direkt auf den Speicher zugegriffen (DMA), um die Belastung des Mikroprozessors erheblich zu reduzieren (**Bild 3**).

Manche CRTCs verfügten über Zusatzfunktionen wie die Lichtstift-erkennung: Ein Stift oder (bei Spielen) eine Pistole mit einem lichtempfindlichen Widerstand oder Transistor wurde verwendet, um ein Register mit den Bildschirmkoordinaten zu laden, auf die der Stift zeigte. So konnte eine Cursorposition programmiert werden, und ein ganzer Zeichenblock leuchtete auf, um den Cursor anzuzeigen. Für die CRTCs konnte man auch Attribute programmieren,

so dass ein Zeichen unterstrichen, invertiert, hell oder blinkend dargestellt wurde.

Ich habe an Terminalsystemen gearbeitet, die CRTCs verwendeten, aber ich habe nie etwas für sie programmiert. Sie erleichterten zwar das Leben eines Systementwicklers, aber es war immer noch eine Menge Arbeit, sie für das gewünschte Zeichen- und Bildschirmformat einzurichten und den DMA-Zugriff zu programmieren.

Wenn Sie also das nächste Mal Probleme haben, ein Text- oder Grafik-LCD zum Laufen zu bringen, denken Sie an die Entwickler von einst, die umständlich mit CRTCs arbeiten mussten! 

RG – 240058-02



Über den Autor

David Ashton wurde in London geboren, wuchs in Rhodesien (heute Simbabwe) auf, lebte und arbeitete in Simbabwe und lebt heute in Australien. Er interessiert sich für Elektronik, seit er „knienhoch zu einem Grashüpfer“ war. Rhodesien war nicht das Zentrum des Elektronikuniversums, so dass das Anpassen, Ersetzen und Schnorren von Bauteilen zu den Fähigkeiten gehörte, die er sich früh aneignete und auf die er immer noch stolz ist. Er hat ein Elektroniklabor geleitet, war aber hauptsächlich in der Telekommunikation tätig.

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Wenn Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel haben, können Sie sich gerne per E-Mail an die Elektor-Redaktion wenden: redaktion@elektor.de.

Radargesteuerte Beleuchtung

Automatisches Treppenhauslicht mit Anwesenheitsdetektion

Von Gino de Cock (Belgien)

Handelsübliche PIR-gesteuerte Leuchten und Präsenzmelder funktionieren recht gut, aber nur für warme, sich bewegende Ziele. Radargestützte Präsenzmelder arbeiten viel präziser und können auch still stehende Personen erkennen. Dadurch eignen sie sich für die automatische Beleuchtungssteuerung in Büros und kleinen, dunklen Räumen. In diesem Artikel verwenden wir einen solchen Radarsensor, um das Licht in einem dunklen Treppenhaus ein- und auszuschalten.

Sie kennen sicher diese automatischen Leuchten, die von PIR-Sensoren gesteuert werden. Sie schalten sich ein, wenn man an ihnen vorbeigeht, und schalten sich automatisch aus, wenn keine Bewegung mehr registriert wird. So praktisch sie auch sein mögen, sie haben ihren eigenen Kopf und verhalten sich manchmal etwas eigenwillig. Mit der Einführung kostengünstiger radargestützter Präsenzdetectoren ist es möglich geworden, einige der Probleme eines PIR-Sensors zu lösen. Radarmelder bieten eine echte Anwesenheitserkennung, auch wenn Sie sich nicht bewegen, und lassen das Licht an, auch wenn Sie auf der Toilette in Ruhe die Zeitung lesen. Da es sich um ein Radargerät handelt, ist es immun gegen falsch-positive Erkennungen aufgrund von wechselnden Lichtverhältnissen, einer Biene, sich bewegender heißer Luft und so weiter.

Das Radarmodul HLK-LD2410

Der Sensor HLK-LD2410 [1] ist ein hochempfindliches Radarmodul zur Erfassung der

menschlichen Anwesenheit. Es arbeitet im 1,2-Zentimeter-Band, im Mikrowellen-Frequenzbereich um 24 GHz, das die Bundesnetzagentur für Amateurfunk, Amateurfunksatelliten, Funkortungs- und Erderkundungssatelliten vorsieht [2]. Das Band ist weit entfernt vom stark genutzten 2,4-GHz-Wi-Fi-Band. Das von Hi-Link Electronics entwickelte Modul ermöglicht die Erkennung menschlicher Körper für Hausautomatisierungssysteme. Sein Funktionsprinzip beruht auf dem frequenzmodulierten Dauerstrichradar (FMCW), das sowohl bewegliche als auch unbewegliche menschliche Körper erkennt.

FMCW-Radar: Theorie in Kürze

Das Radar basiert auf zwei Funktionsprinzipien. Erstens nutzt es den Doppler-Effekt, um Objekte zu erkennen. Ein Dauerstrichsignal (Continuous Wave, CW) wird gesendet und dann von Materialien wie Metall oder Wasser und somit auch von menschlichen Körpern reflektiert. Wenn sich das reflektie-

rende Objekt (das Ziel) bewegt, ändert sich die Wellenlänge des reflektierten Signals (und damit seine Frequenz) proportional zur Geschwindigkeit des Ziels. Dies wird als Doppler-Effekt bezeichnet. Wir alle kennen den Effekt von vorbeifahrenden Autos oder Zügen. Der Ton ist höher, wenn das Fahrzeug auf Sie zukommt, und niedriger, wenn es sich von Ihnen entfernt.

Die Distanz zu einem Ziels kann durch Frequenzmodulation (FM) des CW-Signals erfolgen. Wenn die Signalfrequenz linear nach oben (oder unten) verschoben wird, hat das empfangene reflektierte Signal nicht dieselbe momentane Frequenz wie das gesendete Signal, da es verzögert ist. Die beiden Frequenzen unterscheiden sich geringfügig, und dieser Unterschied ist proportional zur Entfernung zwischen Sender und Ziel. Da es jedoch auch den Dopplereffekt gibt, funktioniert diese Methode nur bei statischen oder sich langsam bewegenden Objekten wirklich genau.

Die gesamte Komplexität der obigen Aussage wird im Modul HLK-LD2410 auf einen einzigen digitalen Ausgang reduziert, der den Zustand des erkannten Ziels anzeigt. Der Ausgang ist high, wenn eine Person erkannt wird, egal ob sie sich bewegt oder nicht. Die Elektronik hinter dem Radarmodul kann daher einfach bleiben und muss nur auf einen binären Zustand reagieren.



Quelle: Adobe stock

Die Schaltung

Die in diesem Artikel beschriebene Schaltung wird als automatisches Licht für ein Treppenhaus eingesetzt (**Bild 1**). Ein radarbasierter Anwesenheitsdetektor schaltet das Licht ein, wenn eine Person erkannt wird, und andernfalls aus. Außerdem darf das System nur dann funktionieren, wenn die Intensität des Umgebungslichts gering ist, mit anderen Worten, es muss eine Dunkelheitserfassung aufweisen. Der Schaltplan ist in **Bild 2** dargestellt.

Ein lichtabhängiger Widerstand (LDR, R2) wird zur Erkennung von Dunkelheit verwendet. Wenn es dunkel ist, ist der Widerstand von R2 hoch, viel höher als der Wert von R1+P1, so dass die Spannung am Gate von IC1 hoch ist. Dadurch wird IC1 eingeschaltet, was dazu führt, dass das Gate des P-Kanal-MOSFET T1 auf low gezogen wird. T1 beginnt zu leiten und schaltet das Modul MOD1, einen kostengünstigen Gleichspannungswandler ein. Nun wird auch das Radarmodul MOD2 und damit die Präsenzerkennung von Menschen wird aktiviert. Die Schaltung ist somit scharfgeschaltet, was durch LED1 angezeigt wird. In Abwesenheit von Menschen ist der

Ausgang von MOD2 low, der n-Kanal-MOSFET T2 sperrt und die Last (eine LED-Kette) bleibt dunkel. Wenn ein menschlicher Körper erkannt wird, geht der Ausgang von MOD2 auf high und schaltet T2 ein, was wiederum die Last einschaltet. Ziemlich simpel, nicht wahr?

Disco-Lights

Es gibt jedoch einen Haken: Wenn das Licht eingeschaltet ist, sieht der LDR keine Dunkelheit mehr. Die Spannung am Gate von IC1 fällt ab und IC1 schaltet sich aus. Dadurch wird der Rest der Schaltung abgeschaltet und das Licht geht aus. Jetzt sieht der LDR wieder Dunkelheit und schaltet IC1 ein und so weiter und so fort: Das System beginnt zu oszillieren. Um ein solches Disco-Light zu vermeiden, wurden R4 und IC2 hinzugefügt. IC2 hat die gleiche Funktion wie IC1, nur dass es vom Ausgang des Radarmoduls und nicht vom LDR gesteuert wird. IC1 und IC2 besitzen Open-Collector-Ausgänge und können daher parallel geschaltet werden, um T1 in einer „verdrahteten ODER“-Konfiguration anzusteuern. Sobald eine Person erkannt wird, wird IC2 eingeschaltet. Dadurch wird die Schaltung auf die gleiche Weise wie IC1 mit Strom versorgt,



Bild 1. Der Autor beleuchtet mit der beschriebenen Schaltung sein sehr steiles Treppenhaus. Auf keinen Fall darf das Licht ausgehen, wenn sich jemand auf der Treppe befindet. Die LED-Leiste ist unter dem Treppengeländer montiert und beleuchtet die Stufen. Der Sensor befindet sich am oberen Ende der Treppe, so dass sich alle Stufen im Erfassungsbereich des Radars befinden.

auch wenn IC1 ausgeschaltet wird. Das Licht schaltet sich so erst aus, wenn der menschliche Körper verschwunden ist. Dadurch wird sichergestellt, dass die Schaltung zwei stabile Zustände hat.

Stromversorgung

Die Schaltung ist für die Ansteuerung einer einfachen LED-Kette mit einer Gleichspannung von bis zu 24 V vorgesehen. Die Versorgungsspannung wird an Stifte 3 (+) und Stift 4 (-), die Last wird an Stifte 2 (+) und Stift 1 (-) des Verbinders K1 angeschlossen.

Das Radarmodul benötigt 5 V_{DC}. Ein preiswertes Gleichspannungswandler-Modul MP1584 (MOD1) senkt die Versorgungsspannung für die LED-Ketten auf einen für das Radarmodul geeigneten Wert. MP1584-basierte Gleichspannungswandler-Module gibt es im Internet in vielen Varianten, einstellbar oder mit fester Ausgangsspannung. Beide können verwendet werden, auch wenn die Ausgangsspannung nicht 5 V beträgt, da es in der Regel ausreicht, nur einen Widerstandswert zu ändern, um eine Ausgangsspannung von 5 V zu erhalten. Verwenden Sie die folgende Gleichung, um den Widerstandswert zu bestimmen:

$$V_{\text{out}} = 0,8 \cdot \frac{R_A + R_B}{R_B}$$

Hier ist R_A der Widerstand zwischen Pin 4 des MP1584-ICs und V_{out}. R_B ist der Widerstand

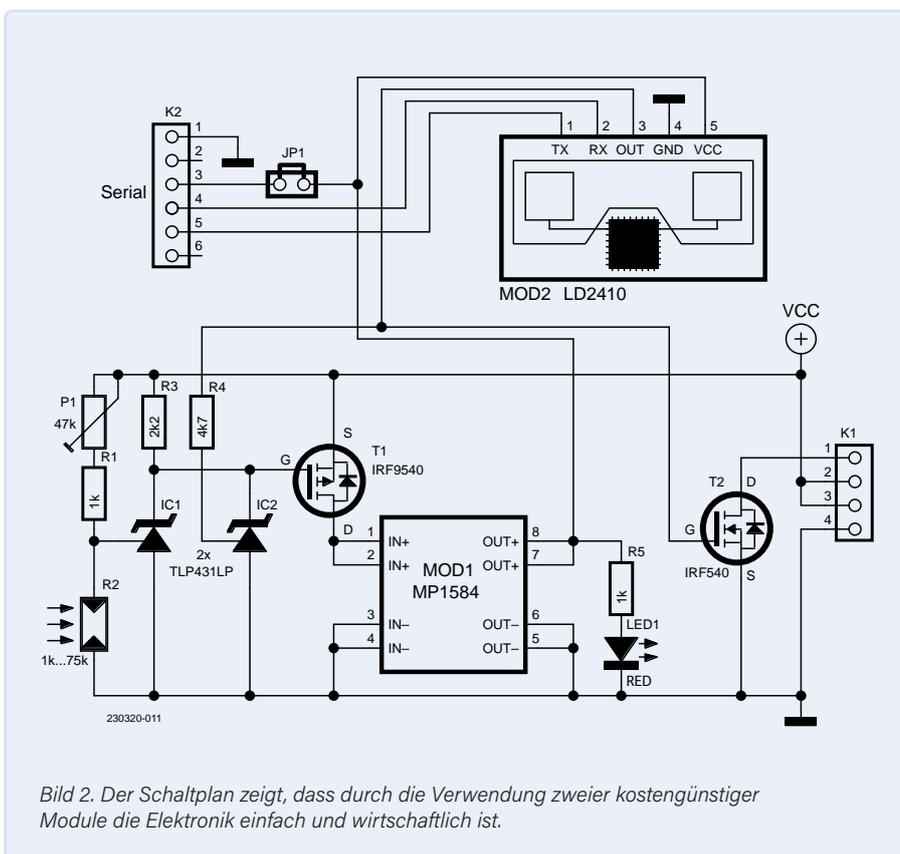


Bild 2. Der Schaltplan zeigt, dass durch die Verwendung zweier kostengünstiger Module die Elektronik einfach und wirtschaftlich ist.

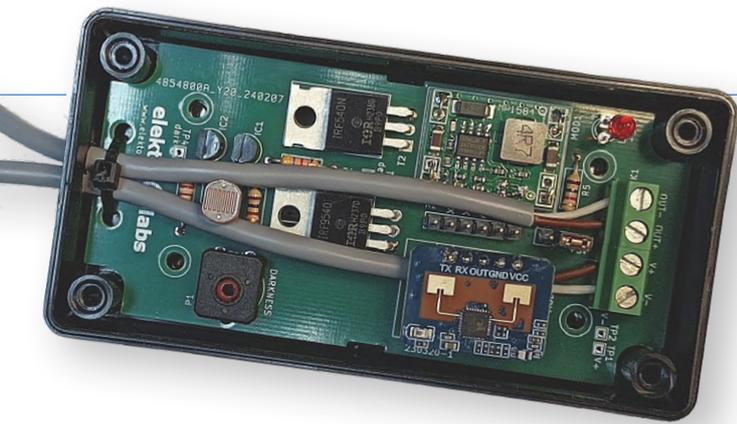


Bild 3. Der im Elektor-Labor gebaute und getestete Prototyp passt in ein kostengünstiges Kunststoffgehäuse.

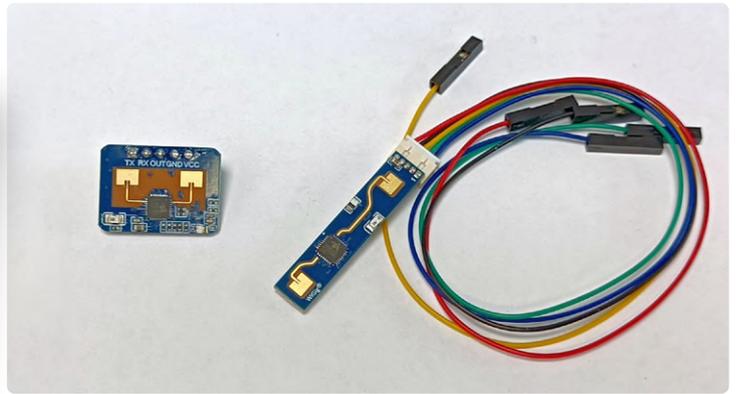


Bild 4. Zwei Versionen von Anwesenheitsdetektoren mit HLK-LD2410. Beide können mit unserem Platinenentwurf verwendet werden.

zwischen Pin 4 und GND. Bei dem für unseren Prototyp verwendeten Modul hatte R_B einen Wert von 8,2 k Ω . Da das Modul für einen 12-V-Ausgang konfiguriert war, hatte R_A einen Wert von 115 k Ω , und um die Ausgangsspannung auf 5 V zu verringern, muss R_A einen Wert von 43 k Ω haben. Bei unserem Prototyp konnte dies erreicht werden, indem ein 68-k Ω -Widerstands parallel zu R_A eingesetzt wurde. Eine andere Möglichkeit ist, R_A durch einen 39-k Ω -Widerstand in Reihe mit einem 3,9-k Ω -Widerstand zu ersetzen (wenn $R_B = 8,2$ k Ω).

Die Platine

Im Elektor-Labor wurde eine kleine Platine für das Projekt entworfen, die mit Testpunkten zur Überprüfung einiger wichtiger Signale ausgestattet ist. Die Platine passt in ein billiges ABS-Kunststoffgehäuse 1591XXA von Hammond (Bild 3). Das Radargerät lässt sich gut in das Gehäuse einbauen und benötigt keine Löcher an der Vorderseite, was der Ästhetik zugute kommt. Obwohl die Antenne auf der Vorderseite am empfindlichsten ist,

kann es nicht schaden, die Rückseite mit einem Stück Metall (Folie) abzuschirmen, wenn Sie eine Detektion von hinten sicher ausschließen wollen.

Das Radarmodul HLK-LD2410 gibt es in mindestens zwei verschiedenen Formen (Bild 4), auf einer 16x22 mm großen Platine mit einer großen 1x5-polige Stiftleiste im 0,1-Zoll-Raster und auf einem 7x39 mm langen schmalen Platinenstreifen mit einem kleinen Verbinder im mit 0,05-Zoll-Raster. Beide Typen können verwendet werden, allerdings sind ihre Steckverbinder nicht auf die gleiche Weise belegt. Die Signale des ersten Typs sind nach TX, RX, OUT, GND und VCC geordnet, des zweiten Typs OUT, TX, RX, GND und VCC. Die entworfene Platine ist für den ersten Typ gedacht, bietet aber Platz für den zweiten. Das lange und schmale Modul, das wir bestellt hatten, wurde mit einem Adapterkabel geliefert, das einfach an die Platine angeschlossen werden kann. Es lassen sich also Modulplatinen ohne große Fummelei verwendet werden. Der Stromanschluss K1 ist für die Montage „nach unten“ vorgesehen, das Stromversor-

gungs- und das LED-Kabel laufen über die Platine zur gegenüberliegenden, kurzen Seite hinunter. Die beiden Löcher auf dieser Seite können zur Zugentlastung verwendet werden (zum Beispiel mit einem Kabelbinder, siehe Bild 3), aber wenn Sie es anders machen wollen, können Sie das gerne tun.

Konfigurieren des Radars

Das Modul HLK-LD2410 funktioniert zwar *out of the box*, kann aber über eine serielle Schnittstelle mit dem Windows-Programm *LD2410 Tool* [3] konfiguriert werden. Dies erklärt den Anschluss K2, eine serielle Schnittstelle, die für ein 3,3-V-FTDI-kompatibles USB-zu-Seriell-Kabel verdrahtet ist.

Das Radarmodul muss bei der Konfiguration natürlich mit Strom versorgt werden, entweder über das USB-serielle Kabel (JP1 geschlossen) oder über die Stromversorgung der Schaltung (JP1 offen). Im zweiten Fall muss der LDR dunkel sein, da die Schaltung sonst nicht einschaltet. Mit P1 stellen Sie die Lichtintensität (den Grad der Dunkelheit) ein, bei der das Gerät einschaltet.

Wenn das Radarmodul eingeschaltet ist, können Sie es konfigurieren. Schließen Sie zunächst das Modul an. Das Tool kennt zwei Hauptmodi. Um das Radar auszurichten, aktivieren Sie am besten den *Engineering Mode* und klicken auf *Start* (Bild 5). Daraufhin wird die Sensorik live in zwei Diagrammen angezeigt, auf der linken Seite das bewegte und auf der rechten Seite das unbewegte Ziel. Der Erfassungsbereich ist in acht Bereiche von je 75 cm unterteilt. Die Empfindlichkeit jedes Bereichs kann von 0 bis 100 eingestellt werden, wobei 100 die geringste Empfindlichkeit bedeutet (das heißt, für diesen Bereich ist die Erkennung dann deaktiviert). Wenn die blaue oder rote Linie die grüne Linie erreicht oder kreuzt, schaltet der Ausgang auf high. Wenn Sie mit den gewählten Empfindlichkeitsstufen zufrieden sind, klicken Sie auf *Config*, um die Einstellungen dauerhaft im Sensor zu speichern.

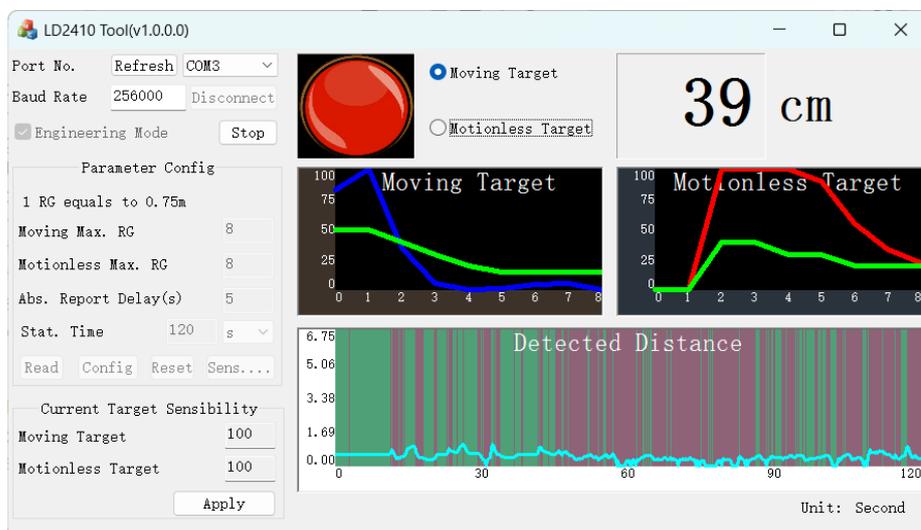
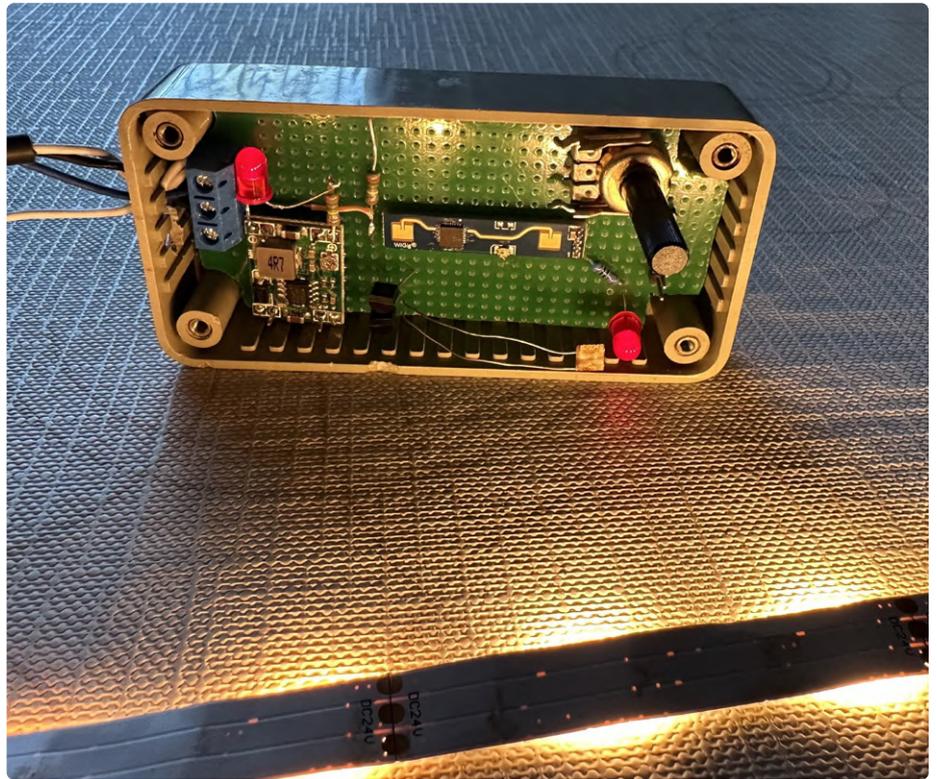


Bild 5. Mit Hilfe des LD2410-Tools ist die Konfiguration des Radars ein Kinderspiel.

Bild 6. Der vom Autor gebaute Prototyp.

Das war's, Ihr Anwesenheitsdetektor ist einsatzbereit (**Bild 6**). Eine weitere Idee für eine Anwendung wäre ein Rotlicht/Grünlicht-Bewegungsmelder (wie in der beliebten Fernsehserie *Squid Game*), bei dem sich eine Person an einem bestimmten Ort aufhalten muss, sich aber nicht bewegen darf. Viel Spaß! ◀

RG — 230320-02



Über den Autor

Während seines Elektronikstudiums und in den darauf folgenden Jahren hat Gino de Cock seine Fähigkeiten bei der Reparatur von Fernsehgeräten verfeinert. Heute ist er in der dynamischen Welt der Rundfunk- und TV-Industrie zu Hause. Doch wann immer sich ihm eine interessante Herausforderung bietet, setzt er wieder seinen metaphorischen „Elektronikhut“ auf.

Gino de Cock meint: „Ohne die Anleitung des unglaublichen Benjamin Van Osselaer wäre ich heute nicht da, wo ich bin. Er war nicht nur ein Meister des Fernsehens, er war mein Mentor, und ich möchte an dieser Stelle meine tiefste Dankbarkeit für seine unschätzbaren Lehren und seine Inspiration zum Ausdruck bringen.“

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

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



Passende Produkte

➤ **SunFounder Kepler Kit (Ultimatives Starterkit für Raspberry Pi Pico W)**
www.elektor.de/20730

➤ **Seed Studio Grove Ultraschall-Abstandssensor**
www.elektor.de/20027



Stückliste

Widerstände:

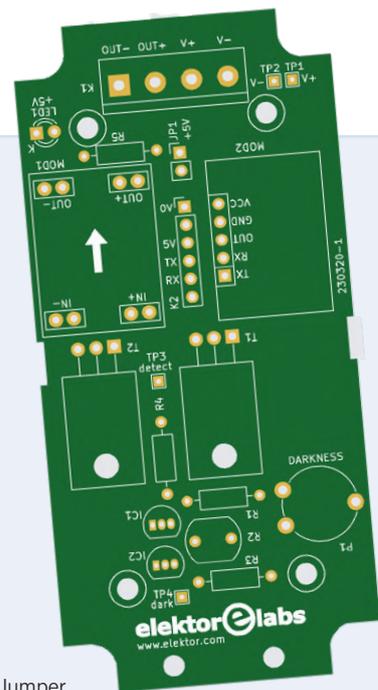
(bedrahtet, 0,25 W)
R1, R5 = 1 k
R2 = LDR
R3 = 2k2
R4 = 4k7
P1 = 47 k Trimpoti

Halbleiter:

IC1, IC2 = TL431, TO92
LED1 = LED 3 mm, rot
T1 = IRF9540
T2 = IRF540

Außerdem:

JP1 = 1x2-polige Stiftleiste, Raster 2,54 mm + Jumper
K1 = 1x4-polige Schraubklemme, Raster 5 mm
K2 = 1x6-polige Stiftleiste, Raster 2,54 mm
MOD1 = MP1584 DC-DC-Wandler
MOD2 = HLK-LD2410 Radar modul + 1x5-polige Stiftleiste, Raster 2,54 mm
Gehäuse Hammond 1591 XXA



WEBLINKS

- [1] Detektor HLK-LD2410 für menschliche Anwesenheit:
<https://hlktech.net/index.php?id=988>
- [2] Bundesnetzagentur, Frequenzplan: <https://t1p.de/8vlx4>
- [3] LD2410-Konfigurationsprogramm:
<https://h.hlktech.com/Mobile/download/fdetail/204.html>

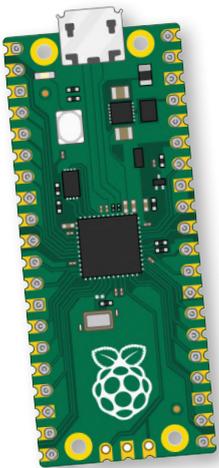


Digitale Wasserwaage und aktive Stroboskop-Scheibe für Plattenspieler

Feinabstimmung Ihres Plattenspielers mit nur einem Gerät

Von Antonello Della Pia (Italien)

Um optimal zu funktionieren, muss ein Plattenspieler unter anderem in einer perfekt horizontalen Position stehen und der Plattenteller sich mit der richtigen Geschwindigkeit drehen. Das hier vorgestellte Gerät, das auf einem Raspberry Pi Pico basiert, führt diese beiden Prüfungen durch und verfügt dank einer innovativen Lösung über eine Stroboskop-Scheibe, die ohne ein mit 50 Hz pulsierendes Stroboskoplicht auskommt.



Es mag überraschen, aber trotz der Dominanz des hochauflösenden Multimedia-Streamings ist das Wiedererleben des Interesses an der analogen Musikwiedergabe, insbesondere an Vinyl-Schallplatten, unbestreitbar. Dieser Trend wird durch die Verkaufsstatistiken auf dem Schallplattenmarkt bestätigt. Gleichzeitig ist der Markt für spezielle Hardware wie Plattenspieler, Tonabnehmer, Phonovorverstärker und Zubehör umfangreicher, vielfältiger und zugänglicher denn je und zieht sowohl neue Enthusiasten als auch altgediente Liebhaber der High-Fidelity-Musikwiedergabe an.

Von der Idee zur Verwirklichung

Ohne in die hitzige Debatte über analoge oder digitale Klangqualität einsteigen zu wollen, es ist klar, dass die optimale Wiedergabe von Schallplatten von einem empfindlichen Gleichgewicht verschiedener elektrischer und mechanischer Faktoren abhängt. Vorausgesetzt, die Hardware ist funktionstüchtig und richtig eingestellt,

gehören zu den kritischen Faktoren die Ausrichtung des Tonabnehmers, die Nivellierung und die genaue Drehgeschwindigkeit des Plattentellers.

Wir hatten die Idee, eine moderne digitale Alternative zur klassischen Wasserwaage und eine Stroboskop-Scheibe zu entwickeln, die zum Abstimmen von Plattenspielern verwendet werden kann. Dies wurde durch die Verfügbarkeit der speziellen runden LC-Displays von Waveshare [1] und die beeindruckenden Fähigkeiten des Raspberry Pi Pico [2] möglich. Das Projekt umfasst auch das Modul GY-521 mit einem Positionssensor MPU-6050 von TDK InvenSense sowie (nur) zwei Tasten, die den Zugriff auf die Stromversorgung, die Kalibrierung, die Modusauswahl und die Überwachung der Batteriespannung erlauben. Das Gerät ist energieautark, kompakt und so leicht, dass es auf dem Plattenteller sitzen kann, ohne die Rotation zu beeinträchtigen. Es bietet einen Messbereich von $\pm 10^\circ$ auf der x- und der y-Achse (mit einer Auflösung von $0,1^\circ$) und einen „Linear-Modus“ für Messungen von $\pm 90^\circ$ auf der x-Achse. Es zeigt nicht nur die Neigung numerisch an, sondern stellt auch eine „Libelle“ innerhalb des Anzeigebereichs grafisch dar. Im Stroboskop-Modus kann es die Standard-Drehzahlen von 33,33 rpm und 45,00 rpm (Umdrehungen pro Minute) ohne externe Beleuchtung überprüfen.

Der Raspberry Pi Pico

Das Herzstück dieses Projekts ist aber der kleine und preiswerte Raspberry Pi Pico in **Bild 1**. Er wurde im Januar 2021 dem Markt vorgestellt und ist seit kurzem auch mit Drahtlos-Konnektivität erhältlich. Im Gegensatz zu früheren Raspberry-Pi-Boards, die als SBCs (Single-Board-Computer) betrachtet werden, die in der Lage sind, auf dem Linux-Kernel basierende Betriebssysteme zu hosten und auszuführen (typischerweise

Bild 1. Der in diesem Projekt verwendete Raspberry Pi Pico.



Raspberry Pi OS), beherbergt der Raspberry Pi Pico tatsächlich nur einen Mikrocontroller und die für seinen Betrieb unbedingt erforderlichen Komponenten. Das Konzept ähnelt also eher dem des klassischen Arduino UNO, wenn auch, wie wir sehen werden, mit viel größeren Fähigkeiten, dank des RP2040-Mikrocontrollers, einem Dual-Core Arm Cortex-M0+ mit 264 KB internem RAM, 2 MB Flash-Speicher und einer Taktfrequenz von 133 MHz, die leicht übertaktet werden kann.

Schaut man sich das Übermaß von Schnittstellen (USB, UART, SPI, I²C, ADC und PWM), die 26 Multifunktions-GPIO-Pins und (bei der neuen Version) die WLAN-Konnektivität (802.11n mit 2,4 GHz) an, mag man es kaum glauben, für welchen Spottpreis man ein Board erhält, das auch für recht anspruchsvolle Projekte in Bezug auf Rechenleistung und Verwaltung externer Baugruppen geeignet ist. Die vollständigen Funktionen und die gesamte Dokumentation zum Raspberry Pi Pico finden Sie auf der Website des Herstellers [3].

Das Modul GY-521 mit dem Sensor MPU-6050

Das GY-521-Modul basiert auf dem MPU-6050-Chip, einer IMU (Inertial Measurement Unit) in sechssachsiger MEMS-Technologie (Micro ElectroMechanical System) mit einem Drehratensensor (Gyroskop mit drei Achsen) und einem Beschleunigungsmesser mit ebenfalls drei Achsen). Obwohl das Modul nicht mehr ganz neu ist, wird es immer noch gerne und häufig in Projekten mit Arduino oder anderen Mikrocontrollern verwendet, wenn die Position eines Objekts im umgebenden Raum bestimmt werden muss (zum Beispiel bei Robotern, Drohnen, zur Gestenerkennung, bei Virtual-Reality-Schnittstellen, in tragbaren Geräten). Es ist gut erhältlich, preiswert und wird von etlichen speziellen Bibliotheken gut unterstützt. Nach einigen Tests erwies sich das Modul als einfach anzuschließen und für die Anforderungen des Projekts ausreichend genau und stabil. Das Funktionsprinzip dieses Sensortyps verdient sicherlich weitere Betrachtungen; hier sein nur erwähnt, dass sich in den wenigen Quadratmillimetern des Chips neben den elektronischen Komponenten auch ein MEMS befindet, das man sich der Einfachheit halber als eine winzige bewegliche Masse in einem Gehäuse vorstellen kann, die als Reaktion auf die dynamischen Kräfte, denen der Chip ausgesetzt ist, eine Abstandsänderung und damit eine Kapazitätsänderung zwischen einer Reihe von Elektroden erzeugt. Diese Schwankungen werden in ein 16-Bit-Digitalsignal umgewandelt, das über eine I²C-Schnittstelle zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung steht. Im Falle der digitalen Wasserwaage werden die Daten der x- und der y-Achse in leicht verständliche numerische und grafische Angaben auf dem Display umgewandelt. Ein Artikel, der die Technologie und Verwendung dieses und anderer MEMS-Sensoren sehr gut beschreibt, ist auf der Website von *Last Minute Engineers* [4] zu finden. **Bild 2**, das einem Diagramm aus dem Datenblatt [5] entnommen ist, zeigt schematisch die Sensorachsen und der Rotationspolarität.

Die Stroboskop-Scheibe

Die Funktionsweise der Stroboskop-Scheibe, die üblicherweise zur Überprüfung der Drehgeschwindigkeit eines Drehtellers verwendet wird, beruht auf einem optischen Phänomen, das seit langem bekannt ist und beispielsweise im Maschinenbau genutzt wird (Einstellung des Zündzeitpunkts von Verbrennungsmotoren und Überprüfung von hochtourig rotierenden Elementen wie Turbinen). Ein konstant rotierendes Objekt wird von einer pulsierenden Lichtquelle mit einer bekannten und festen Frequenz beleuchtet, so dass das Objekt für das menschliche Auge nur dann sichtbar wird, wenn es vom Licht getroffen wird. Wenn die Frequenz der Lichtimpulse gleich oder ein Vielfaches der Rotationsgeschwindigkeit ist, erscheint das Objekt still stehend.

Auf der typischen Scheibe links in **Bild 3** erkennt man ein Muster aus äquidistanten Linien entlang des Umfangs und in der Mitte die Angabe *50 Hz*. Eigentlich hätte die Scheibe mit einer (heute veralteten) Glühlampe beleuchtet werden müssen, die mit Netzwechselstrom betrieben wird und durch die Beleuchtung mit der positiven und negativen Halbwelle hundert Lichtimpulse pro Sekunde ($50 \text{ Hz} \times 2 = 100 \text{ Hz}$) erzeugt. Die Anzahl der Linien n , die erforderlich sind, um sie bei dieser Frequenz stationär zu sehen, ergibt sich aus der Formel:

$$n = (f \times 2 \times 60) / \omega$$

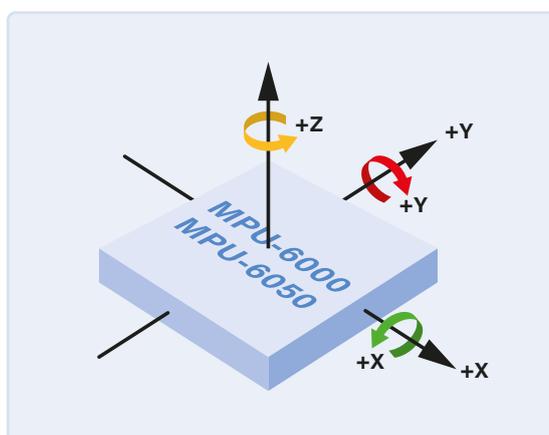


Bild 2. Die drei Achsen des Sensors.

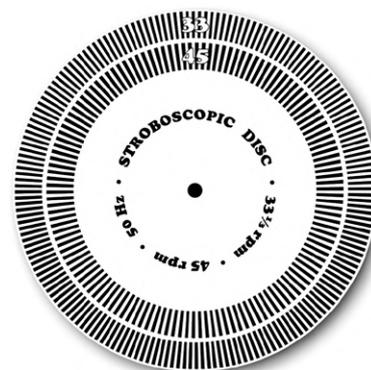


Bild 3. Eine traditionelle Stroboskop-Scheibe (links) und eine digitale, aktive Scheibe (rechts). (Quelle für das Bild der Scheibe: Wikimedia Commons https://de.wikipedia.org/wiki/File:Stroboscopic_disc.svg)

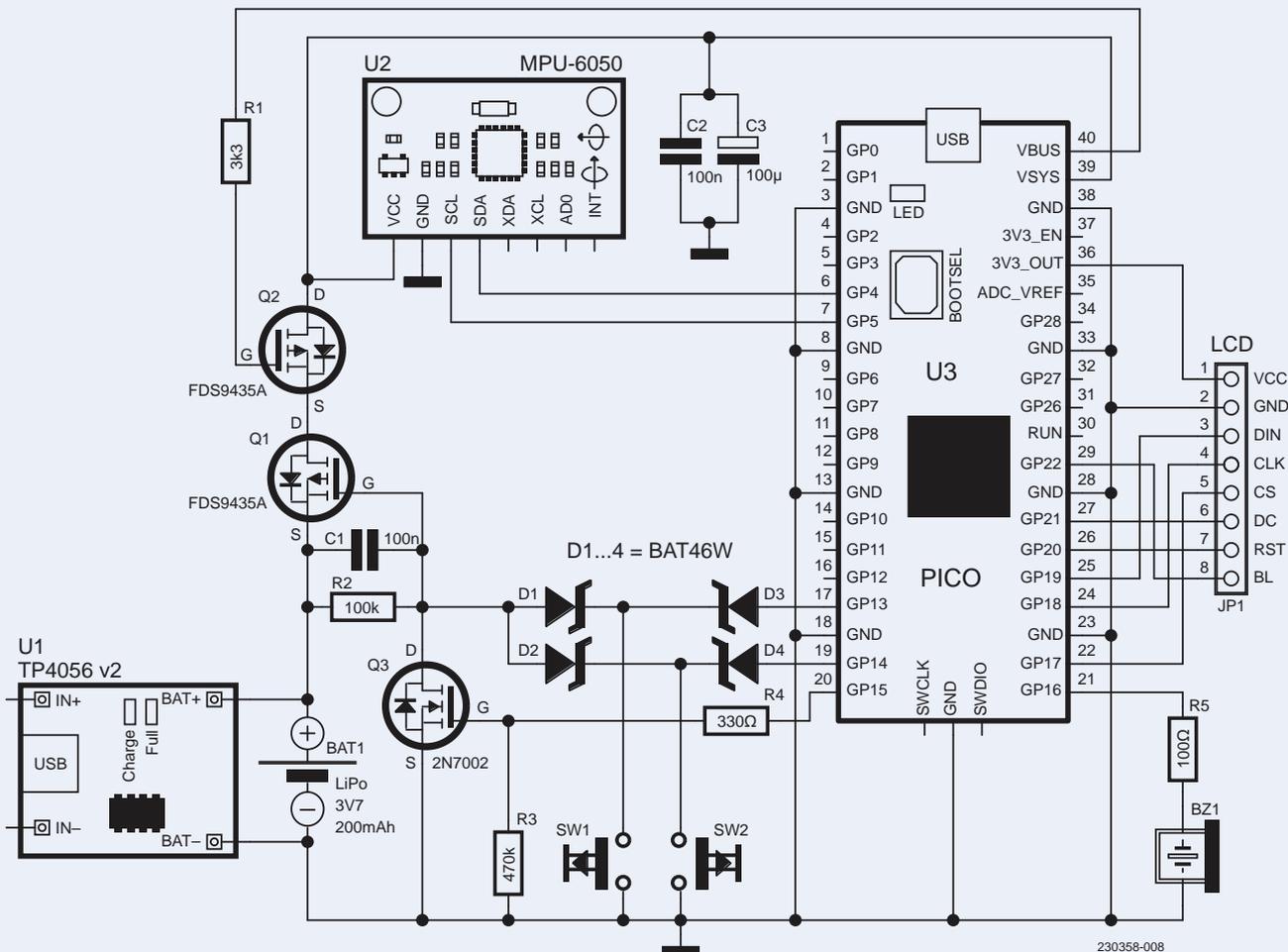


Bild 4. Das Projekt in drei Modulen.

wobei f die Netzfrequenz in Hertz und ω die einzustellende Winkelgeschwindigkeit in Umdrehungen pro Minute (33,33 U/min oder 45,00 U/min) ist. Aus dieser Formel wird deutlich, dass das gleiche Ergebnis erzielt werden kann, wenn man die Anzahl der Referenzlinien konstant lässt und die Frequenz der Lichtquelle variiert. Konkret zeigt sich, dass bei sechzig Bezugspunkten die Frequenz der Lichtimpulse gleich der Anzahl der Umdrehungen pro Minute sein muss, um sie stationär zu sehen:

$$\omega = (f \times 60) / n = (f \times 60) / 60 \quad \omega = f$$

In der Praxis zeichnet die Software bei der digitalen Stroboskop-Scheibe sechzig gleichmäßig verteilte Liniensegmente entlang des äußeren Umfangs des LCDs. Wenn man dann die für die Hintergrundbeleuchtung zuständigen LEDs (BL-Klemme des Displays) mit einem Rechtecksignal geeigneter Frequenz (33,33 Hz oder 45,00 Hz) ansteuert, sieht man die Linien auch dann noch, wenn die Drehgeschwindigkeit des Plattentellers (und damit des Displays) gleich der Frequenz selbst ist, da die LEDs nur bei einer Halbperiode (hoher Pegel) der Rechteckwelle aufleuchten.

Auf diese Weise sind die Segmente selbst nicht auf eine externe Lichtquelle angewiesen, sondern leuchten auf und werden bei der gewünschten Frequenz sichtbar, daher das Prädikat „aktive“ Scheibe. Um genau die gewünschten Frequenzen zu erreichen, habe ich einen

unkonventionellen Ansatz gewählt, der aber perfekt funktioniert, wie wir in der Beschreibung der Firmware sehen werden. Beachten Sie, dass die anderen grafischen Elemente auf dem Display dank der Nachbildwirkung des Auges weiterhin gut sichtbar bleiben.

Schaltbild in drei Modulen

Wie in **Bild 4** zu sehen ist, ist der Schaltplan nicht besonders komplex. Das Display und das Sensormodul werden an die Standardpins der SPI- beziehungsweise I²C-Schnittstelle des Raspberry Pi Pico angeschlossen, die aus der im Datenblatt angegebenen Pinbelegung ersichtlich sind. Der Anschluss JP1 ist mit dem LCD verbunden, und seine Leitungen sind direkt auf die Platine gelötet. Die Stromversorgung des Displays erfolgt über den Regler auf dem Mikrocontroller-Board, dessen GPIO-Pins wohlgemerkt keine höheren Spannungen als 3,3 V unterstützen. Also Achtung!

Durch die Nutzung der Standardpins (der MCU-Hardware) werden Schnittstellenprobleme von vornherein vermieden. Das Sensormodul verfügt über einen eigenen Low-Dropout-Regler (LDO), so dass die Kompatibilität der Signalpegel gewährleistet ist. Der Zustand der Tasten SW1 und SW2 wird von Pin GP13 und Pin GP14 (als Eingang mit Pull-up-Widerstand konfiguriert) überwacht. Mit den beiden Tasten lassen sich alle verfügbaren Funktionen wählen und – dank Interaktion mit der Stromversorgungsschaltung – das Gerät auch ein- und ausschalten.

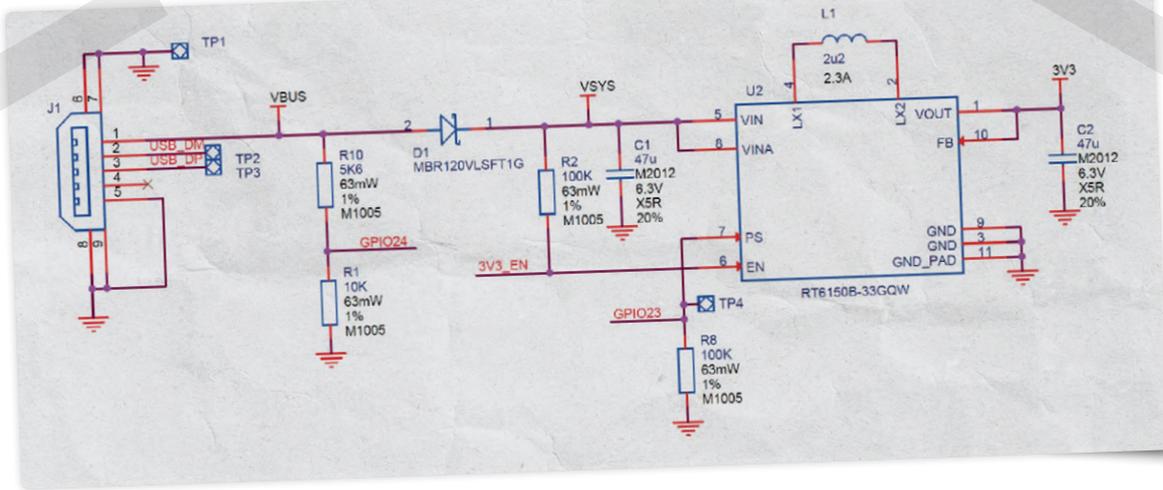


Bild 5
Stromversorgungskette
des Raspberry Pi Pico.
(Quelle: Raspberry Pi
Pico-Datenblatt [15])

Das mit dem TP4056-Chip und dem Micro-USB-Eingang ausgestattete Modul U1 ermöglicht das Aufladen eines kompakten, rechteckigen Lithium-Polymer-Akkus (LiPo) mit 3,7 V Nennspannung und 200 mAh Kapazität, was eine Laufzeit von mindestens einer Stunde gewährleistet. Wichtig zu beachten ist, dass der Akku über eine eingebaute Schutzschaltung verfügen muss.

Es ist ratsam, den Akku bei ausgeschaltetem Gerät mit einem handelsüblichen Handy-Lader zu laden, um eine korrekte Anzeige des Ladeschlusses zu erhalten. MOSFET Q1 [6] ist der eigentliche Schalter des Geräts, der normalerweise von R2 im AUS-Zustand gehalten wird (Gate-Anschluss auf demselben Potential wie Source). Wenn einer der beiden Schalter gedrückt wird, nimmt das Gate über D1 oder D2 ein negatives Potential relativ zur Source an, wodurch Q1 leitet und (über Q2) den VSYS-Anschluss auf dem Raspberry Pi Pico erreicht, wodurch der Mikrocontroller aktiviert wird.

Sobald die Ausführung der Firmware beginnt, geht GP15 auf High und schaltet Q3 ein (und als Folge Q1), das Display schaltet sich ein und die Taste kann losgelassen werden. Der MOSFET Q2 kann normalerweise als „transparent“ für den Stromfluss betrachtet werden, bis das USB-Kabel für die Programmierung angeschlossen wird; in diesem Fall sorgt die VBUS-Spannung dafür, dass Q2 deaktiviert wird und verhindert damit, dass die gleiche Spannung durch die interne Diode von Q1 zur Batterie zurückkehrt.

Andererseits wird die Schaltung durch langes Drücken (bis das Display dunkel wird) einer der beiden Tasten ausgeschaltet. GP15 kehrt in den Low-Status und Q3 in den OFF-Status zurück, dann wird der Stromfluss durch Loslassen der Taste Q1 gestoppt. Wie bereits erwähnt, kann diese Ein/Aus-Konfiguration (die im Internet in mehr oder weniger ähnlichen Schaltungen häufig zu finden ist) auf jeden Mikrocontroller angewendet werden. Sie erfordert nur zwei freie Pins (nur eine Taste wird benötigt) und ein paar Zeilen Code. Die Funktion von D3 und D4 besteht lediglich darin, zu verhindern, dass die Batteriespannung - die normalerweise höher als 3,3 V ist - über R2, D1 und D2 GP13 und GP14 erreicht und möglicherweise Schäden verursacht.

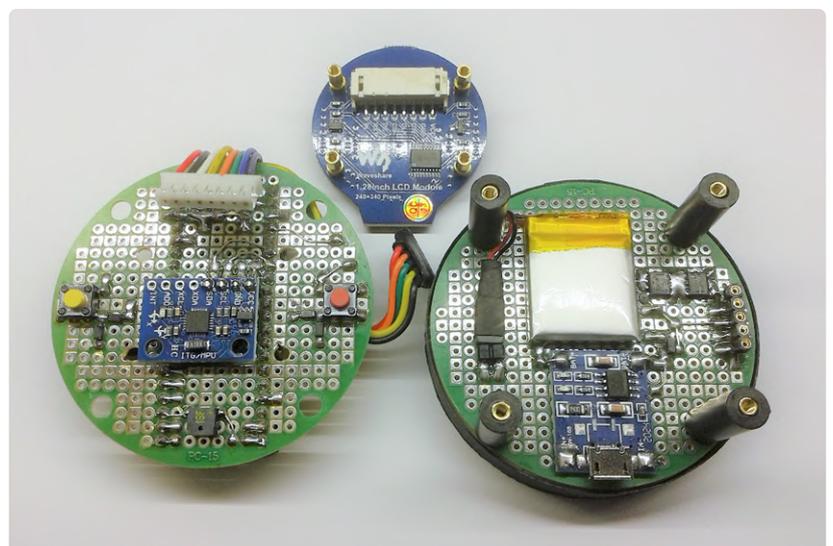
Das Schaltbild der Stromversorgungskette des Boards, das dem Datenblatt des Raspberry Pi entnommen und in **Bild 5** dargestellt ist, verdeutlicht die Funktionsweise der

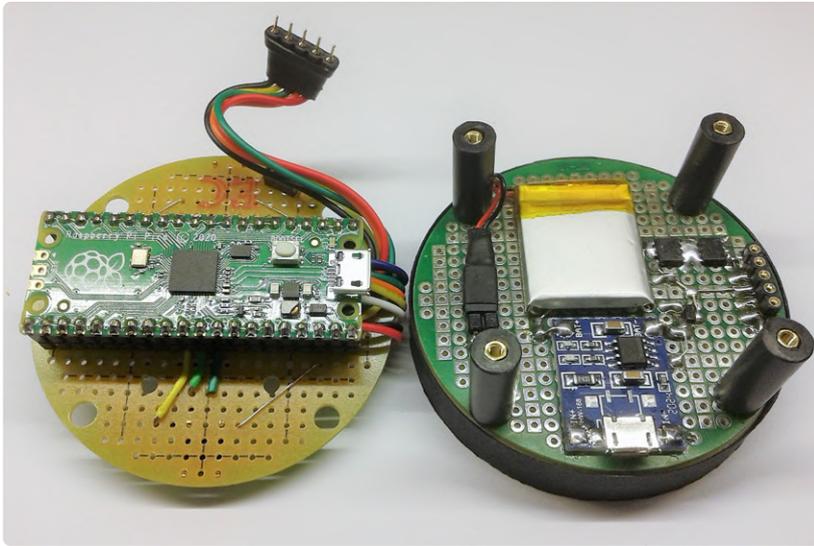
Stromversorgung noch mehr. Beachten Sie die Diode D1, die verhindert, dass die an VSYS angelegte Spannung (wie in diesem Fall) zur Micro-USB-Buchse gelangt, und den Widerstandsteiler, der es ermöglicht, GPIO24 als Sensor für die Anwesenheit von VBUS zu verwenden. Im Schaltplan dieses Projekts schließlich verhindert C1 das sofortige Einschalten, wenn die Batterie angeschlossen ist, C2 und C3 sind die üblichen Lade- und Entkoppelkondensatoren, und der Summer bestätigt mit einem kurzen Piepton Ein- und Ausschalten des Geräts.

Verwirklichung des Prototyps

Der Entwurf wurde wie üblich auf Prototyp-Platinen realisiert. Ich habe zwei runde Grundplatten mit einem Durchmesser von 60 mm verwendet, die im Internet leicht erhältlich sind, und sie mit vier Abstandshaltern gestapelt. In **Bild 6** ist zu sehen, dass auf der Oberseite der oberen Platine (links) die Tasten mit den Dioden, der Summer und das Bewegungssensormodul angebracht sind. Darüber ist das abmontierte runde Display zu sehen, das (umgedreht) über dem Bewegungssensormodul befestigt wird. Die acht Anschlussdrähte führen zur Platinenunterseite, auf der sich der Raspberry Pi Pico befindet (siehe **Bild 7**), und verschwinden darunter. Von dort aus gehen auch die fünf Verbindungen über einen Stecker mit Stiftkontakten zur zweiten, unteren Platine,

Bild 6. Der Prototyp,
Stromversorgungs- und
Displayseite.





▲
Bild 7. Der Prototyp, zeigt von der Raspberry Pi Pico Seite (links).

auf der sich die für die Stromversorgung zuständigen Komponenten befinden (das TP4056-Modul, die Batterie, die MOSFETs und so weiter).

Diese Platine ist wiederum an einer kleinen Scheibe mit demselben Durchmesser und einer Dicke von einem Zentimeter befestigt (die ich aus Holz gefertigt habe, aber jedes steife, leichte Material ist geeignet), die in der Mitte gebohrt ist, damit der Zentrierstift (Solldurchmesser 7,2 mm) des Plattentellers hindurchpasst, um sowohl im Wasserwaagen-Modus (Plattenteller steht still) als auch im Stroboskop-Modus (Plattenteller dreht sich) einen stabilen Halt zu bieten. Je nach Verfügbarkeit habe ich sowohl SMD-Bauteile als auch bedrahtete Bauteile verwendet. Die Montage war nicht ganz unproblematisch, da alle Bauteile in die Abmessungen der Platinen eingepasst werden mussten, wobei auch noch die Zentrierung des Displays und des Sensors zu beachten war. Und zu guter Letzt sollte die ganze Angelegenheit ja auch noch stabil und starr sein. Sicherlich hätte ein speziell entworfenes Platinenlayout die Herstellung stark vereinfacht, was jedoch meiner Meinung nach zu viel Aufwand für einen einzelnen Prototyp bedeutet hätte.

Raspberry Pi Pico und die Arduino-IDE

Es mag ein unwahrscheinlicher Vergleich sein, aber der Pico hat tatsächlich einen RP2040-Mikrocontroller an Bord und ist daher eher mit einem Arduino UNO vergleichbar (obwohl der Leistungsvergleich gnadenlos zugunsten des Pico ausfällt) als mit den Einplatinencomputern der regulären Raspberry-Pi-Reihe. Die Arduino-IDE (integrierte Entwicklungsumgebung) ermöglicht das Schreiben von Code zur Programmierung einer breiten Palette von Mikrocontrollern und Boards, weit mehr als die „offiziellen“ Arduino-Modelle. Mit dem in die IDE integrierten Tool Boardsverwalter ist es möglich, so genannte Cores zu installieren, die bestenfalls vereinfachend als zusätzliche Softwaremodule bezeichnet werden können, die die Kompatibilität zwischen neuen Boards und Mikrocontrollern, auch von Drittanbietern, mit der Arduino-Umgebung (IDE, vorhandene Bibliotheken, Sketch-Struktur) gewährleisten.

Die ziemlich beeindruckend lange Liste der verfügbaren Cores und damit kompatiblen Boards und MCUs kann unter [7] eingesehen werden. Zu den beliebtesten Cores

gehören sicherlich die AVR-Mikrocontroller ATtiny und ATmega, die Espressif-Boards ESP8266, ESP32, STM32 und jetzt der RP2040. Alle Boards und Controller auf der Liste können daher programmiert werden, ohne die Arduino-IDE-Umgebung und die C/C++-Sprache verlassen zu müssen. Mit einigen Tricks lässt sich sogar Assembler-Code in die Sketche einfügen. Auch die meisten der unzähligen Arduino-Bibliotheken lassen sich nutzen. Die Kerne sind im Allgemeinen öffentlich zugänglich und wurden von leidenschaftlichen und kompetenten Programmierern geschrieben.

Der für den Raspberry Pi Pico installierte Kern wurde von Earle F. Philhower III entwickelt und übertrifft sogar den offiziellen Arduino-Kern an Vielseitigkeit und Leistung. Alle zugehörigen Informationen und Dokumentationen sind auf der GitHub-Seite des Autors verfügbar [8]. Wenn Sie zum ersten Mal einen Raspberry Pi Pico mit der Arduino-IDE verwenden, müssen Sie einige einfache Schritte durchführen. Nach der Installation des Kerns und der Auswahl des richtigen Boards (wie in **Bild 8** gezeigt) schließen Sie ein Micro-USB-Kabel an das Board an und drücken und halten Sie die **BOOTSEL**-Taste des Boards, bevor Sie es an den Computer anschließen.

Wählen Sie den klassischen Blink-Sketch aus den Beispielen aus und laden Sie ihn auf das Board. Die Onboard-LED des Raspberry Pi Pico sollte zu blinken beginnen und der Name des Boards und seine Portnummer werden in **Menü** → **Werkzeuge** → **Port** angezeigt. Von nun an können Sie Sketche direkt bearbeiten, kompilieren und laden, wie bei jedem Arduino-Board.

Firmware und Betrieb

Ich habe das Programm geschrieben, das das Projekt in der ultimativen Arduino-IDE 1.8.19 ausführt, nachdem ich den Arduino-Kern für den Raspberry Pi Pico installiert habe, ganz wie oben beschrieben. Das Display verwendet den GC9A01-Controller, der nicht weit verbreitet ist und auch nicht von frei verfügbaren Bibliotheken unterstützt wird. Daher habe ich mich entschieden, die vom Hersteller bereitgestellte Demobibliothek zu verwenden und sie an die Bedürfnisse des Projekts anzupassen.

Alle notwendigen Dateien (Konfiguration, Treiber, Schriftarten, Bibliotheken), die unter [9] verfügbar sind, befinden sich im Sketch-Ordner zusammen mit der Hauptdatei namens *Raspberry_Pico_Livella_Digital_Strobo.ino* und sind alle in der Arduino-IDE sichtbar. Darüber hinaus ist die Installation von zwei weiteren Bibliotheken erforderlich, der sehr gut dokumentierten *MPU6050_light .2.1* [10], um das Sensormodul zu verwalten, und *Running-Average 0.4.2* [11], die für die Berechnung des gleitenden Mittelwerts der Daten, die ihr über einen Ringpuffer zugeführt werden, nützlich ist. Das Listing ist ziemlich lang und ausführlich - mehrere hundert Zeilen Code.

Ich empfehle daher interessierten Lesern, es im Editor zu öffnen und mit Hilfe der vielen Kommentare und Informationen, die ich dort eingefügt habe, kennenzulernen. Hier sollen nur der funktionale Aufbau des Programms und die interessantesten Abschnitte des Codes beschrieben



werden. Wenn man schnell durch das Listing scrollt, sollte einem sofort auffallen, dass zusätzlich zu den Funktionen, die man in einem Arduino-Sketch erwartet, die Funktionen `setup1()` und `loop1()` vorhanden sind. Daran kann man ersehen, dass das Programm die beiden Kerne des RP2040-Mikrocontrollers nutzt. Jeder Kern kann die in den jeweiligen `setup()` und `loop()` enthaltenen Anweisungen unabhängig vom anderen ausführen. Beim Programmstart, nach dem üblichen Einbinden externer Bibliotheken und Dateien, der Definition der notwendigen Variablen und Instanzen, sorgt die Haupt-Setup-Routine `core0` für die Pin-Definition, die Initialisierung des EEPROMs, der SPI- und I²C-Kommunikationsprotokolle, des MPU-6050-Sensors und des Displays.

Nach Überprüfung der Batteriespannung (GP15 auf logischem High-Pegel) wird die Stromversorgung aktiviert. Anschließend wird in Abhängigkeit vom Zustand der Tasten eine Reihe von bedingten Anweisungen ausgeführt, die die Kalibrierungsroutinen, die initialen Informationen auf dem Display und die Einstellung des Betriebsmodus betreffen. Bereits an dieser Stelle sind die wiederkehrenden Befehle `rp2040.idleOtherCore()` und `rp2040.resumeOtherCore()` notwendig, weil die beiden Kerne nicht gleichzeitig in den Flash-Speicher und zu anderer Peripherie schreiben können. Um eine ordnungsgemäße Ausführung des Codes ohne gegenseitige Blockierung zu gewährleisten, muss also jeder Kern in der Lage sein, bei Bedarf eine Pause einzulegen und den anderen später wieder zu aktivieren.

Wenn der Wasserwaagen-Modus ausgewählt wurde, ist die Hauptschleife `loop()` (immer `core0`) für die Verarbeitung der Daten vom MPU-6050-Sensor (x- und y-Koordinaten), die Verarbeitung des gleitenden Mittelwerts, die Formatierung der Strings durch die `sprintf()`-Funktion [12], die Anzeige der Daten und das Zeichnen der sich bewegenden Libelle beziehungsweise Blase auf dem Display verantwortlich. Die für das Zeichnen zuständigen Funktionen `Paint_DrawString_EN()` und `Paint_DrawCircle()` befinden sich in der vom Display-Hersteller bereitgestellten Bibliothek `GUI_paint.cpp`. Der Effekt der bewegten Blase wird einfach dadurch erreicht, dass ein schwarzer Kreis mit den aktuellen Koordinaten und unmittelbar danach ein grüner oder weißer Kreis mit den neuen Koordinaten gezeichnet wird, und zwar in einem kontinu-

ierlichen Prozess des Löschens und Wiederbeschreibens. Dank der Taktfrequenz des Mikrocontrollers, die über das entsprechende Menü in der IDE auf 250 MHz erhöht wurde, und des Puffers für den gleitenden Mittelwert ist der Bewegungseffekt realistisch genug. Im anderen Fall, wenn der Stroboskop-Modus gewählt wurde, führt `loop()` nur die Routine aus, die die LEDs der Hintergrundbeleuchtung des Displays ansteuert. Nur für den Fall, dass die beiden Tasten gleichzeitig gedrückt werden, wird die Funktion aufgerufen, die die Batteriespannung anzeigt. `setup1()` enthält nur die Anweisung `delay(1000)`, die den Start von `loop1()` um 1 s verzögert. Der zweite Kern führt dann die Funktionen `drawBackgroundElements()` und `buttonsOperation()` aus, die für das kontinuierliche Neuzeichnen der festen Hintergrundelemente des Displays beziehungsweise für das Erkennen und Verarbeiten etwaiger Tastendrucke zuständig zeichnen.

Durch die Aufteilung der Aufgaben auf die beiden Kerne werden die Reaktionsgeschwindigkeit der Schnittstelle und die Glätte der Grafik erheblich verbessert. Nachfolgend sind im Listing alle verwendeten Funktionen aufgeführt, genau beschrieben und kommentiert. Ich füge hier nur kurze erläuternde Kommentare für die Funktionen hinzu, die ich für besonders interessant halte. Die Funktion `drawStrobeMarks()`, einem im Internet verfügbaren Beispiel [13] entnommen, vereinfacht und auf das Projekt zugeschnitten wurde, zeichnet 60 äquidistante Liniensegmente mit der gewünschten Länge entlang des Umfangs des Displays.

Ausgehend von dem Konzept, den Umfang in 60 Abschnitte zu unterteilen, die jeweils durch den Wert $2\pi / 60$ Grad im Bogenmaß repräsentiert werden, werden mit Hilfe geeigneter trigonometrischer Funktionen die x- und y-Koordinaten der 60 Punkte und damit die zum Zeichnen der Segmente erforderlichen Koordinaten in einer `for`-Schleife berechnet und anschließend an die Funktion `Paint_DrawLine()` übergeben.

Die Funktion `flashBackLight()` sorgt im Stroboskop-Modus für die Hintergrundbeleuchtung, indem sie eine Rechteckwelle mit einer Frequenz von 33,33 Hz oder 45,00 Hz und einem Tastverhältnis von 50 % erzeugt, die es ermöglicht, das Display während der PWM-Halbperiode mit hohem Pegel zu beleuchten und die Segmente

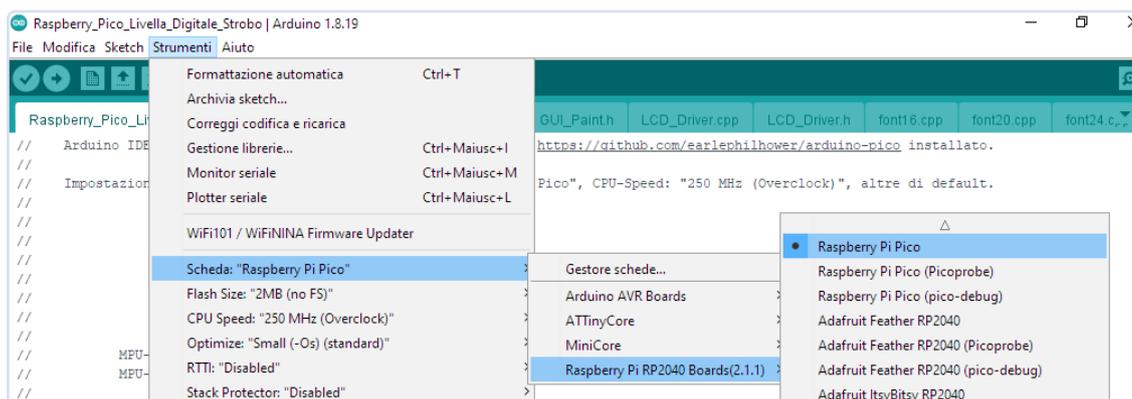


Bild 8. Auswahl des Raspberry Pi Pico im Boardverwalter der (italienischen) Arduino-IDE.



▲
Bild 9. Ein paar Schnappschüsse Displays des Prototyps.

am Umfang in den entsprechenden Zeitabständen sichtbar zu machen. Die genaue Dauer jeder Halbperiode in Mikrosekunden wird durch die Messung der verstrichenen Zeit mit der Funktion `rp2040.getCycleCount()` ermittelt, die die Anzahl der seit dem Einschalten des Mikrocontrollers ausgeführten Taktzyklen zurückgibt. Bei einer Taktfrequenz von 250 MHz dauert ein Zyklus $1/250.000.000 = 0,000000004$ s. Dies bedeutet eine Messgranularität von 4 ns, wobei eine verstrichene Mikrosekunde 250 Zyklen entspricht.

Die Rechteckwelle liegt an dem Pin GP22 (*DEV_BL_PIN*) an, der die Hintergrundbeleuchtung des Displays steuert. Beim Prototyp wurden mit einem Frequenzzähler/Tachometer die Frequenzen 33,333 Hz und 45,000 Hz gemessen, was mit einer Schwankung von nur wenigen Tausendstel Hertz sehr genau ist. Darüber hinaus sorgt die Funktion `rp2040.fifo.push(pushCount)` dafür, dass der zweite Kern die Anzahl der verstrichenen Halbperioden geteilt durch 60 erhält, um bei jeder abgeschlossenen Umdrehung ein längeres Referenzsegment auf dem Display anzuzeigen. Ich habe bereits die Verwendung eines EEPROMs zum Speichern von Kalibrierungsparametern erwähnt. Der RP2040-Mikrocontroller ist eigentlich nicht mit einem solchen Speicher ausgestattet. Die Bibliothek *EEPROM.h* ermöglicht jedoch die Simulation eines EEPROMs in einem Teil des Flash-Speichers. Mit der Anweisung `EEPROM.begin(4096)` werden die Sektoren des emulierten EEPROMs in das RAM kopiert, so dass das Programm für Lese- und Schreiboperationen auf sie zugreifen kann.

Die Funktion `storeOffsetsValues()` kümmert sich um die Berechnung der Messoffsetwerte, füllt eine benutzerdefinierte Struktur (*struct*) mit diesen Daten und schreibt sie mit Hilfe der Funktion `EEPROM.put(eeAddress, offsetValues)` in das emulierte EEPROM. Bei jedem Einschalten liest die Funktion `setOffsetsValues()` die Daten über `EEPROM.get(eeAddress, offsetValues)` und setzt die richtigen Offset-Werte für Gyroskop und Beschleunigungsmesser. Der Datentyp *struct* (benutzerdefinierter zusammengesetzter Typ) ermöglicht es, mehrere Werte, die zu unterschiedlichen Datentypen gehören (*byte*, *int*, *float*, *string*, *boolean*, *char*), bequemerweise als einen einzigen Block zu behandeln. Schließlich sollte man darauf hinweisen, dass die

Bibliothek *EEPROM.h* und die Programmfunktionen `EEPROM.begin()` und `rp2040.xxxxx()` spezifisch für *Raspberry Pi Pico Arduino core* sind.

Praktische Anwendung

Am Ende des Artikels möchte ich noch ein paar kurze Anmerkungen zur praktischen Verwendung dieses Geräts machen. Die erste Operation, die durchgeführt werden muss, ist die Kalibrierung, die darin besteht, das Gerät auf eine perfekt stabile, flache und horizontale Referenzfläche zu stellen. Ohne das Gerät zu bewegen, drücken Sie gleichzeitig die beiden Tasten: Auf dem Display erscheint die Meldung *Calibration, wait..*, und innerhalb weniger Sekunden die Meldung *Calibration done!* Es folgt der Bildschirm für den Normalbetrieb mit der Blase der Libelle und der grünen Anzeige *CAL*, die nur in diesem Fall sichtbar ist und die erfolgreiche Kalibrierung anzeigt. Das bedeutet, dass die Referenzwerte zur Korrektur eventueller Offset-Fehler gespeichert wurden und bei jedem weiteren Einschalten automatisch abgerufen werden. Sie können das Gerät dann ausschalten, indem Sie eine der beiden Tasten lange gedrückt halten. Bei normalem Gebrauch wird das Gerät durch Drücken der roten Taste in den Wasserwaagenmodus eingeschaltet. Durch anschließendes kurzes Drücken derselben Taste kann man dann zwischen den Modi wechseln.

Legen Sie dann die Wasserwaage auf den Plattenteller, wobei Sie den Stift als Referenz verwenden. Wenn der Plattenteller nicht perfekt waagrecht steht, müssen Sie – je nach Art Ihrer Installation – den Teller ausrichten oder die Füße oder die Aufhängung justieren, bis sich die elektronische Blase auf dem Display in der Mittelposition stabilisiert (sie wird grün) und die numerischen Anzeigen so nahe wie möglich an Null herankommen. Mit der gelben Taste schalten Sie die Stroboskop-Funktion ein. Durch erneutes kurzes Drücken wechselt der Testmodus zwischen 33,33 U/min und 45,00 U/min. Dann wird bei rotierendem Plattenteller, vorzugsweise bei schwachem Umgebungslicht, die Geschwindigkeit überprüft. Wenn sie korrekt ist, erscheinen die Segmente am Umfang des Displays still stehend. Wenn sie sich im Uhrzeigersinn zu drehen scheinen, ist die Geschwindigkeit zu hoch, wenn sie sich gegen den Uhrzeigersinn zu drehen scheinen, ist sie zu niedrig. Einen zusätzlichen Hinweis gibt das längere Segment in der Mitte, das bei jeder Umdrehung kurz aufleuchtet. Wenn die Geschwindigkeit korrekt ist, leuchtet es immer an der gleichen Stelle auf. Bei manchen Drehtellern lässt sich die Drehzahl mit einem speziellen Drehknopf einstellen, bei anderen mit mehr oder weniger zugänglichen Trimmern. Bei riemengetriebenen Geräten kann ein falscher Wert auch auf einen alten und ausgeleierten Riemen hinweisen; andere Ursachen können eine unzureichende Schmierung des Drehlagers oder Probleme mit der Stromversorgung oder dem Motor sein. Im Zweifelsfall ist es immer ratsam, für eine gründliche Überholung einen Fachmann hinzuzuziehen. **Bild 9** schließlich zeigt einige Schnappschüsse vom Display des Geräts im Betrieb.



Ein Video zum Abschluss

In diesem Projekt wurden verschiedene Themen behandelt, zum Beispiel die Verwendung des Raspberry Pi Pico und seine Möglichkeiten, die Programmierung in der Arduino-IDE unter Ausnutzung der Dual-Core-Funktionalität, der Einsatz eines MEMS-Trägheitssensors mit einem praktischen Beispiel für den Anschluss und die Verwendung, der Gebrauch eines runden LC-Displays, die Funktionsweise der Stroboskop-Scheibe, eine spezielle Methode zur Erzeugung eines Rechtecksignals mit einer sehr präzisen Frequenz, die Energieverwaltung über nur eine Taste (was mit wenigen Zeilen Code auf jeden Mikrocontroller anwendbar ist) und die Messung der Batteriespannung. Obwohl die Prämisse ein Projekt für eine sehr spezifische Zielgruppe vermuten lässt, glaube ich, dass auch alle Bastler und Maker, die keinen Plattenspieler und keine Sammlung von Langspielplatten besitzen, nützliche Informationen und interessante Erkenntnisse finden können, die sie für andere neue Projekte entwickeln und nutzen können. Schließlich kann der Blick auf ein kurzes Demonstrationsvideo auf YouTube [14] nicht schaden. ◀

RG — 230358-02

Stückliste

Widerstände:

(alle 1/4 W, 1%)
R1 = 3k3
R2 = 100 k
R3 = 470 k
R4 = 330 Ω
R5 = 100 Ω

Kondensatoren:

C1, C2 = 100 n, 50 V, Polyester oder keramischer Multilayer
C3 = 100 μ, 10 V, Elko

Halbleiter:

Q1, Q2 = FDS9435A P-Kanal-MOSFET
Q3 = 2N7002 N-Kanal-MOSFET
D1...D4 = BAT46W (Kleinsignal-Schottky-Diode)
U1 = TP4056 Lademodul ohne Schutzfunktion
U2 = Modul GY-521 mit MPU-6050
U3 = Raspberry Pi Pico

Außerdem:

Display = Rundes LCD 19192 (1,28", 240x240) von Waveshare
BUZZER = SMD-Summer
SW1, SW2 = schließender Taster für Platinenmontage
BAT1 = LiPo-Akku, 3,7 V, 200 mAh, mit Schutzfunktion
Buchsen/Steckerleisten
Abstandshalter
Runde Lochrasterplatine, PC-15, 60 mm

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

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



Passende Produkte

- **Raspberry Pi Pico RP2040**
www.elektor.de/19562
- **Dogan Ibrahim, Hardware Projects for Raspberry Pi, Elektor 2014**
E-Buch, englisch, PDF: www.elektor.de/16969



Über den Autor

Antonello Della Pia fühlt sich seit seiner Kindheit von Elektrizität und elektronischen Geräten angezogen. Er verfügt über ein Diplom als Elektrotechniker der Oberschule. Antonello hat seine Leidenschaft für analoge und digitale Elektronik stets gepflegt und weiterentwickelt. Zurzeit beschäftigt er sich mit Mikrocontrollern und Programmierung und versucht, seine Fähigkeiten zu verbessern. Antonello liebt es, Projekte zu entwickeln und einzubringen, die so originell wie möglich und - wie er hofft - auch interessant sind.

WEBLINKS

- [1] Waveshare-Webseite des LCD-Display-Moduls: <http://tinyurl.com/5n87a8pt>
- [2] Raspberry-Pi-Familie: https://de.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi
- [3] Webseite Raspberry Pi Pico: <https://raspberrypi.com/products/raspberry-pi-pico/>
- [4] MPU6050-Tutorial auf der LastMinuteEngineers-Website: <http://tinyurl.com/rxr8av6k>
- [5] Datenblatt MPU6050: <http://tinyurl.com/mwr5fw6>
- [6] Datenblatt FDS9435A: <https://onsemi.com/pdf/datasheet/fds9435a-d.pdf>
- [7] Arduino-IDE, inoffizielle URL-Liste zur Unterstützung von Drittanbieter-Boards: <http://tinyurl.com/5edvv322>
- [8] Arduino-Kern für Raspberry Pi Pico, Earle F. Philhower, III: <http://tinyurl.com/489kwb3k>
- [9] Software-Paket für dieses Projekt: <https://elektormagazine.de/230358-02>
- [10] Arduino Bibliothek MPU6050_light: https://github.com/rfetick/MPU6050_light
- [11] Arduino-Bibliothek RunningAverage: <https://github.com/RobTillaart/RunningAverage>
- [12] C-Bibliotheksfunktion sprintf() auf tutorialspoint: <http://tinyurl.com/58ymn9wz>
- [13] ArduinoWatch - moononournation: <https://github.com/moononournation/ArduinoWatch>
- [14] Video-Demo auf YouTube: <https://youtu.be/tun6wH5gKDA>
- [15] Datenblatt Raspberry Pi Pico: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/pico-datasheet.pdf>

Open Source

und seine Bedeutung für die Elektronikindustrie (2)



Arduino UNO und Raspberry Pi sind zwei bewährte Open-Source-Lösungen. (Quelle: Mouser Electronics)

Von Mark Patrick (Mouser Electronics)

Im ersten Teil [1] dieser zweiteiligen Beitragsreihe zum Thema Open Source haben wir uns mit der Definition und den verfügbaren Zertifizierungen für Open-Source-Software und -Hardware im Elektronikbereich sowie mit einigen erfolgreichen Produkten aus dem Bereich der Entwicklungs- und Bildungshardware beschäftigt. In diesem zweiten Beitrag analysieren wir den kommerziellen Wert von Open-Source-Lösungen für den Elektronikmarkt, betrachten Trends wie Closed-Source-Hardware in Kombination mit Open-Source-Lösungen und untersuchen die Realisierbarkeit der Verwendung von Open-Source-Hardware (OSHW) in kommerziellen Produkten.

Was bedeutet Open Source für die Elektronikindustrie?

Die größte Stärke eines offenen Systems ist seine leichte Zugänglichkeit. Dies bringt mehrere Vorteile mit sich. Im Software-Bereich entfallen durch das Open-Source-Design alle Einstiegshürden, sodass mehr Entwickler Zugang zum Quellcode erhalten, was wiederum zu mehr Zusammenarbeit, Innovation und einer höheren Entwicklungsgeschwindigkeit für die Host-Lösung führt. Bei der Hardware fallen zwar immer Kosten für das physische Gerät an, aber viele der genannten Vorteile bleiben bestehen. Zudem

kann OSHW mit offenen Designdateien Lieferengpässe abfedern, da sie eine lokale Fertigung ermöglicht und die schnelle Entwicklung von Designvarianten erleichtert.

Der Einfluss von Open-Source-Software auf das BIP der EU

Im Jahr 2021 veröffentlichte die Europäische Kommission die Ergebnisse ihrer Studie [2] über die finanziellen Vorteile von Open-Source-Software und -Hardware. Der Studie zufolge investierten Unternehmen in Europa 2018 eine Milliarde Euro in Open-Source-Software. Dies hatte erhebliche Auswirkungen auf das BIP der EU und trug zwischen 65 Mrd. Euro und 95 Mrd. Euro zur Wirtschaftsleistung bei. Die Kommission führte weiter aus, dass eine 10-prozentige Steigerung der Investitionen im Open-Source-Bereich zu einem Anstieg des BIP um etwa 0,4 % bis 0,6 % (100 Mrd. Euro) führen könnte. Wenn Open-Source-Software mit leistungsstarken Repository-Websites wie GitHub gekoppelt ist, können Tausende von Entwicklern aus aller Welt das System voranbringen und Fehler gemeinsam beheben. Angesichts einer Produktivität und eines Engagements, das weit über das hinausgeht, was selbst bei den besten von der Community unterstützten proprietären Lösungen zu beobachten ist, fühlen sich die Nutzer als Eigentümer der Software. Durch die Komplexität und den Umfang moderner Applikationen ist es für proprietäre Lösungen manchmal schwierig, sich schnell genug weiterzuentwickeln, um die Erwartungen des Marktes zu erfüllen. Auch die Interoperabilität in der digitalen Welt ist von entscheidender Bedeutung, insbesondere für das Internet der Dinge (IoT) und webbasierte Applikationen. Hier können Open-Source-Lösungen einen entscheidenden Beitrag leisten.

Die Herausforderungen von OSHW

Bekannte Namen wie Mozilla Firefox und Android verdeutlichen den Wert und den Erfolg von Open-Source-Software. Doch OSHW-Lösungen hatten es bisher schwerer. Sogar der bereits oben genannte EU-Bericht aus dem Jahr 2021 räumt ein, dass es schwierig ist, die Auswirkungen von OSHW auf den Markt zu beurteilen.

Wie realisierbar ist also eine OSHW-Lösung für die Markteinführung und wie wirkt sie sich auf den Elektronikmarkt aus?

Beim Prototyping kann ein Tool zur Beschleunigung von Projekten beitragen, indem es F&E-Experimente und die Verwendung von vorgefertigten Referenzdesigns und Bibliotheken erleichtert. Wenn man jedoch den Übergang von der Entwicklung zu einer endgültigen Lösung für den Markt betrachtet, können diese Stärken zu Schwächen werden.

Die Anpassungsfähigkeit von OSHW hat ihren Preis, und nur sehr wenige finale Hardware-Applikationen werden sämtliche I/O-Optionen nutzen, die Lösungen wie der Raspberry Pi 5 [3] und Arduino UNO REV 4 [4] bieten. Bei einer Produktion, die über eine Kleinserie von Produkten hinausgeht, kann eine Open-Source-Lösung von der Stange daher wesentlich teurer sein als ein Design, das nur den Mikrocontroller (MCU) und die notwendigen unterstützenden Bauteile enthält.

Außerdem ist Open-Source-Hardware von Natur aus offen, das heißt, sie kann leicht geklont werden, was jede Geschäftsperspektive untergraben kann – vor allem, wenn die produzierte Lösung auch relativ einfach zu kopierenden Code oder Open-Source-Code verwendet.

3D-Drucker

Der Markt für 3D-Drucker ist ein Bereich der Elektronikindustrie, in dem die Stärken offener und Community-geführter Lösungen schon häufig aufgezeigt wurden. Das Thema Klone hat in diesem Bereich jedoch zu Problemen geführt. Ein gutes Beispiel für die Probleme im Zusammenhang mit OSHW ist MakerBot, das jetzt zu Stratasys gehört, einem der weltweit größten Unternehmen im Bereich 3D-Druck.

Das Unternehmen, das sich seit Langem für OSHW einsetzt, baute seinen anfänglichen Erfolg auf dem Open-Source-Projekt RepRap für 3D-Drucker auf. Bei seinem Replicator 2 ging es jedoch von Hardware und GUI zu einem geschlossenen Design über.

In einem Blogbeitrag aus dem Jahr 2012 wies MakerBot auf die Notwendigkeit hin, die Auswirkungen von Nachbauten zu bekämpfen, die das eigene Geschäft untergraben und schädigen [5]. Die Reaktionen in der Community und der Elektronikbranche waren damals gemischt. Während viele das Problem der Klone nachvollziehen konnten und die Änderung als notwendig erachteten, waren andere weniger erfreut über die Abkehr von einem offenen und von der Community unterstützten Geschäftsmodell.

In einem offenen Brief an die 3D-Druck-Community Anfang des Jahres [6] forderte Josef Prusa, CEO von Prusa Research und lautstarker Verfechter von Open-Source-Lösungen, eine Aktualisierung der OSHW-Definition, um 1:1-Klone für kommerzielle Zwecke einzuschränken, ohne andere wichtige Aspekte des Open-Source-Designs zu untergraben. Er wies auch auf das wachsende Problem hin, dass Unternehmen weltweit bestimmte Teile oder das gesamte Design von Open-Source-Lösungen verwenden und dann auf der Grundlage dieser Designs Patente anmelden, bevor sie sie kommerzialisieren und einen zuvor offenen Markt schließen.

Kombination von Open-Source- und Closed-Source-Lösungen

Die Kombination von Open- und Closed-Source-Lösungen kann dazu beitragen, die Vorteile beider Modelle zu nutzen, ohne die Schwächen in Kauf nehmen zu müssen. Der häufigste hybride

Ansatz ist die Verwendung von Open-Source-Lösungen für die Entwicklung und Evaluierung, bevor man zu einem maßgeschneiderten, abgespeckten endgültigen Design übergeht.

Nach der Erstellung eines funktionierenden Prototyps mit einem Arduino UNO REV 4 kann ein Entwickler beispielsweise zu einem maßgeschneiderten endgültigen Design übergehen, das auf derselben 32-Bit-MCU R4M1 3 von Renesas [7] basiert, mit der auch der UNO REV 4 betrieben wird, aber nur die erforderlichen Bauteile enthält.

Ein anderer hybrider Ansatz besteht in der Verwendung von Open-Source-Software mit Closed-Source-Hardware-Plattformen. Dabei wird das geistige Eigentum und die Wettbewerbsfähigkeit der Hardware-Hersteller geschützt und der Entwicklungsweg für die Endnutzer durch die Unterstützung einer großen Auswahl von Open-Source-Referenzcode und -Ressourcen vereinfacht.

Smart Homes mit Open-Source-Lösungen

Mit der wachsenden Beliebtheit von Smart-Home-Technologien hat leider auch die Anzahl von Schnittstellen und Protokollen zugenommen. Das hat zu negativen Benutzererfahrungen infolge der Inkompatibilität der Produkte und der Komplexität der Netzwerke geführt.

Das Matter-Protokoll [8] versucht im Smart-Home-Bereich die Probleme zu lösen, die durch proprietäre Lösungen entstanden sind, indem es die quelloffene Wi-Fi- und Thread-Kommunikation nutzt. Um die Entwicklung des Protokolls zu steuern, wird es von der Connectivity Standards Alliance (CSA) verwaltet, der namhafte Anbieter von Hardware-Bauteilen, Software-Entwickler und Hersteller von Produkten wie Google, Amazon, Intel und Infineon angehören.

Viele sehen Matter als die perfekte Lösung für die Smart-Home-Kommunikation. Es handelt sich um eine quelloffene, freie Software-Lösung für die drahtlose Kommunikation, die von einer großen Auswahl von Anbietern und Herstellern unterstützt wird. Matter überwindet Grenzen, verbessert die Interoperabilität, erhöht die Sicherheit und ermöglicht den lokalen Betrieb ohne Internetverbindung.

Mit dem nRF52840 Development Kit (DK) [9] von Nordic Semiconductor [10] kann das 2,4-GHz-Multiprotokoll-System-on-Chip (SoC) nRF52840 [11] mit dem Open-Source-Matter-Protokoll entwickelt werden (**Bild 1**). Dieses umfangreiche Development-Tool unterstützt Bluetooth 5.2 (einschließlich Bluetooth Low Energy), 802.15.4/Thread, ANT/ANT+ und proprietäre 2,4-GHz-Applikationen sowie NFC.



Bild 1. Das nRF52840 Development Kit von Nordic Semiconductor unterstützt sowohl Matter als auch Arduino UNO REV 3-Shields. (Quelle: Mouser Electronics)

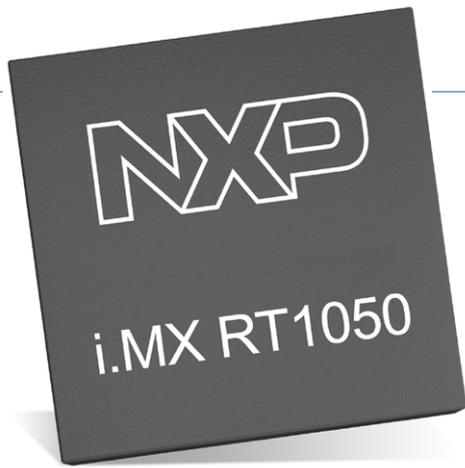


Bild 2. Die MCU i.MX RT1050 von NXP. (Quelle: Mouser Electronics)

Neben der Open-Source-Kompatibilität von Matter unterstützt der hybride Ansatz des nRF52840 DK auch die UNO-Shields von Arduino, die nach dem offenen REV 3-Standard kompatibel sind und die Anbindung von Open-Source-Hardware anderer Hersteller ermöglichen. Mit der Lösung von Nordic können Entwickler Open-Source-Hardware und -Software mit Closed-Hardware nutzen, um die Entwicklung von IoT-Geräten zu optimieren und zugleich die Interoperabilität innerhalb des Smart Homes zu fördern – zum Vorteil des Endnutzers.

MCU-Entwicklung mit Open-Source-Lösungen

Die Kombination von proprietärer Hardware und quelloffener Software ist ein hybrides Konzept, das sich auch bei Echtzeit-Betriebssystemen (Real-Time Operating Systems, RTOS) für MCUs bewährt hat. Die zunehmende Komplexität des Codes in aktuellen RTOS-Implementierungen hat dazu geführt, dass die von der Open-Source-Community unterstützte Lösung Zephyr [12] an Bedeutung gewonnen hat. Zephyr wird von einem Konsortium branchenführender Anbieter, darunter Intel [13], Google, Meta und NXP Semiconductors, getragen und wurde entwickelt, um den wachsenden Anforderungen von MCU-Implementierungen wie Edge-Lösungen und IoT gerecht zu werden.

Das modulare Design von Zephyr und die einfache Wiederverwendung von Code verkürzen die ersten Schritte für Entwickler und fördern die Zusammenarbeit innerhalb der wachsenden Community. Zephyr hat bereits jetzt die höchste Anzahl an einzelnen Contributors und Upstream Commits pro Monat von allen RTOS [14] und unterstützt eine große Auswahl an Hardware, was die Popularität der Plattform und ihre kontinuierliche Anpassungsfähigkeit unterstreicht.

Die Produktfamilie der Crossover-MCUs i.MX RT [15] von NXP (Bild 2) ist ein Beispiel für eine Closed-Source-Hardwarelösung, die für den Betrieb mit Open-Source-Software wie Zephyr konzipiert ist. Als weitere Maßnahme zur Förderung eines hybriden Ansatzes stellt NXP die kostenlose Closed-Source-Entwicklungssuite MCUXpresso zusammen mit seiner Hardware zur Verfügung. Dieses umfassende Angebot ist eng mit der Entwickler-Community verzahnt und enthält IDE-Schnittstellen, Evaluierungskits und Konfigurationstools, mit denen eine nahtlose und effiziente Implementierung von Open-Source-Software wie Zephyr und Matter mit den von Arm Cortex-M-Cores betriebenen MCUs von NXP möglich ist.

Durch die Kombination der i.MX RT MCUs von NXP, MCUXpresso und Open-Source-Embedded-Software sowie Middleware wie

Zephyr können Entwickler in sehr kurzer Zeit qualitativ hochwertige Echtzeit-Lösungen für Industrie- und Verbraucheranwendungen entwickeln – von Mensch-Maschine-Schnittstellen (HMI) bis hin zu High-End-Audiosystemen.

Fazit

Die Bedeutung von Open-Source-Lösungen im Software-Bereich ist unbestritten, aber es ist nicht so einfach, die gleiche Schlussfolgerung für den Hardware-Bereich zu ziehen. Viele Entwickler kommerzieller Produkte sind der Meinung, dass OSHW zu anfällig für Nachahmung oder Verfälschung ist, was zu Rufschädigung und Verlust der Marktposition führen kann.

Zudem wird die Auswahl von Hardware für ein Projekt in den meisten Fällen in erster Linie auf der Grundlage des Betriebsverhaltens und der Kosten getroffen, und wenn eine Open-Source-Lösung diese Anforderungen nicht erfüllt, wird sie einem proprietären Produkt wahrscheinlich nicht vorgezogen werden. Dennoch profitiert marktreife Hardware von Open-Source-Lösungen, sei es durch Unterstützung bei der Entwicklung und beim Prototyping oder durch die Kombination von proprietären Hardware-Lösungen mit Open-Source-Software, Firmware und Hardware-Add-ons von Drittanbietern.

Durch einen hybriden Ansatz können Entwickler die Stärken von Open-Source-Lösungen nutzen, ohne dabei deren potenzielle Schwächen in Kauf nehmen zu müssen. So wird das Beste aus beiden Welten kombiniert, die Entwicklungszeit verkürzt und der Wert des Designs erhöht. Der Endnutzer erhält auf diese Weise ein Produkt, das attraktiver ist als ein vollständig geschlossenes Design, denn es zeichnet sich durch größere Interoperabilität, niedrigere Kosten und ein besseres Betriebsverhalten aus. Das alles ist möglich durch den Einsatz von Open-Source-Lösungen. ◀

240184-02

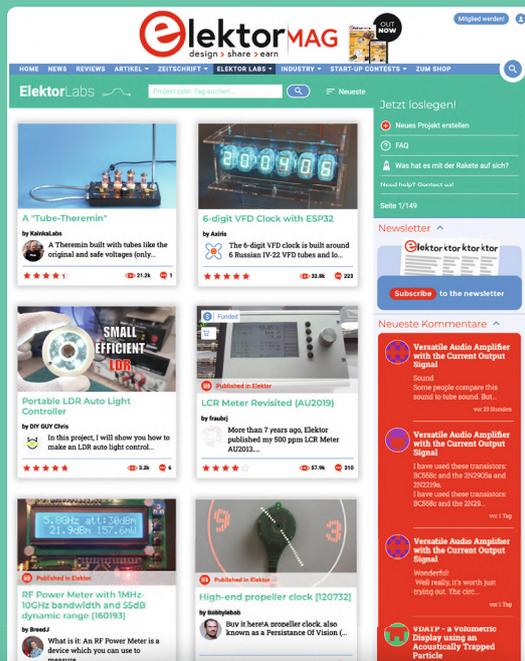


Über den Autor

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 Schraubenschlüssel zu greifen.

WEBLINKS

- [1] Mark Patrick, „Open Source und seine Bedeutung für die Elektronikindustrie“, Elektor embedded world 2024 Spezialausgabe: <https://elektormagazine.de/240087-02>
- [2] Studie über die Auswirkungen von Open-Source-Software und -Hardware auf technologische Unabhängigkeit, Wettbewerbsfähigkeit und Innovation in der EU-Wirtschaft: <https://tinyurl.com/uk5janxs>
- [3] Raspberry Pi 5 Single Board Computer: <https://tinyurl.com/raspberry-pi-5-mouser>
- [4] Arduino UNO R4 Mikrocontroller Board: <https://tinyurl.com/arduino-uno-rev-4-mouser>
- [5] Bre Pettis, „Let’s try that again“, 24. September 2012: <https://t1p.de/wy0to>
- [6] Josef Průša, „The state of open-source in 3D printing in 2023“, 29. März 2023: https://blog.prusa3d.com/the-state-of-open-source-in-3d-printing-in-2023_76659/
- [7] Renesas Electronics RA4M1 32-Bit Microcontroller Group: <https://tinyurl.com/Renesas-Electronics-RA4M1>
- [8] Mouser Presents — „Matter for a smarter home“: <https://tinyurl.com/matter-mouser>
- [9] nRF52840 Development Kit (DK): <https://tinyurl.com/nRF52840-Development-Kit>
- [10] Nordic Semiconductor: <https://tinyurl.com/Nordic-Semiconductor>
- [11] 2,4-GHz-Multiprotokoll-System-on-Chip (SoC) nRF52840: <https://tinyurl.com/nRF52840-Multi-Protocol>
- [12] Zephyr: <https://zephyrproject.org/>
- [13] Intel: <https://tinyurl.com/intel-mouser>
- [14] Projektüberblick Zephyr (PDF): <https://zephyrproject.org/wp-content/uploads/sites/38/2023/09/Zephyr-Overview.pdf>
- [15] NXP Semiconductors i.MX RT Crossover MCUs: <https://tinyurl.com/iMX-RT-Crossover-MCUs>



Starten Sie Ihre Elektronik-Innovationen mit

ElektorLabs

- Kostenlose Veröffentlichung von Projekten
- Experten-Unterstützung
- Gelegenheiten zur Zusammenarbeit
- Zugang zu exklusiven Ressourcen
- Veröffentlichung im Elektor-Magazin

Teilen Sie Ihre Projekte mit anderen!
www.elektormagazine.de/e-labs




elektor
 design > share > earn



M12- Rundsteck- verbinder mit A-Kodierung

Erste Wahl für industrielle
Anwendungen

Von Baptiste Bouix und Caroline Poulard
(Würth Elektronik Frankreich)

Automatisierung verlangt Vernetzung und im industriellen Umfeld gibt es eine bewährte vielseitige Lösung, um beispielsweise Sensoren oder Aktoren anzuschließen: M12-Rundsteckverbinder mit A-Kodierung können zur Übertragung von Signalen, Daten oder als elektrische Leitungen dienen. Worauf dabei zu achten ist, soll im Folgenden ausgeführt werden.

Damit Steckverbinder verschiedener Hersteller kombiniert werden können, haben sich Standards etabliert. Dies ist auch der Fall bei Rundsteckverbindern der Bauform M12. Diese industriellen Steckverbindungen stellen eine kompakte, standardisierte Schnittstelle dar, die für viele Anwendungen geeignet ist: Von der Übertragung von Signalen über Daten bis hin zur Leistungsübertragung ist mit dem robusten, mechanisch und umgebungsbeständigen Klassiker inzwischen so gut wie alles möglich. M12 steht dabei für das einheitliche 12-mm-Verriegelungsgewinde, so genannte Kodierungen legen die einheitliche Zuordnung der Kontakte von Steckern und

Staub und Flüssigkeiten können den Rundsteckverbindern der Bauform M12-A von Würth Elektronik eiSos nichts anhaben: Sie entsprechen den Schutzklassen IP67 beziehungsweise IP68 und sind somit für den Einsatz in rauen Umgebungen geeignet.

Buchsen sowie ihrer elektrischen und mechanischen Eigenschaften fest. Die vielfältigen Einsatzgebiete der M12-Steckverbinder spiegeln sich in der Anzahl der Kodierungen wider, die den Normen (DIN EN 61076-2-xxx) der jeweiligen Einsatzgebiete entsprechen. Die A-Kodierung ist der Ursprung aller Kondierungen bei M12-Verbindern, aus der sich eine Vielzahl weiterer Kodierungen (D, L, X, S, ...) mit unterschiedlicher Kontaktzahl und Schutzart entwickelt hat. M12-Verbinder sind in Ausführungen von zwei bis zu 17 Polen definiert, Rundsteckverbindungen mit A-Kodierung sind mit drei, vier, fünf, acht oder zwölf Polen im Einsatz. Die Polanzahl folgt dabei den vielseitigen Anforderungen: So benötigen etwa Sensoren und Stromversorgungen meist drei und vier Pole, hingegen beanspruchen Profinet- und Ethernet-Applikationen vier und acht Pole, Feldbus, Can-Bus und DeviceNet typischerweise vier und fünf Pole. Für eine anspruchsvolle Signalübertragung sind zwölf Stifte erforderlich. **Tabelle 1** zeigt eine Übersicht der physikalischen Ebenen.

Datenleitung mit Stromversorgung

Würth Elektronik eiSos hält die M12-Rundsteckverbinder als Stecker und Buchse mit A-Kodierung (DIN EN 61076-2-101) bereit. Die Familie WR-CIRCM12 ist als Verbinder für den Gehäuseeinbau, als feldkonfektionierbare Verbinder und vorverkabelte Ausführung mit vier, fünf oder acht Polen erhältlich. M12-A eignet sich für Datenleitungen mit optionaler DC-Stromversorgung, die insbesondere für Feldbusanwendungen in Industrie, Maschinenbau und Automatisierung geeignet sind. Das aktuelle Portfolio von Würth Elektronik eiSos umfasst Stecker und Buchsen für die Gehäusemontage, Versionen für die THT-Platinenmontage, vorverkabelte Lösungen und Ausführungen mit Lötkelchen für Kabel (siehe **Umfangreiches Portfolio**).

Weitere Einsatzgebiete sind in industriellen Umgebungen und insbesondere in der Automatisierung und Robotertechnik genauso zu finden wie etwa im Bereich der erneuerbaren Energien sowie in der Kommunikationstechnik und im Maschinenbau.

Tabelle 1. Übersicht der physikalischen Ebenen der M12-A-Kodierung.

Rundsteckverbinder mit M12-A-Kodierung gibt es von Würth Elektronik mit 4, 5 oder 8 Polen.

Physikalische Ebene	Passende M12 A-kodiert [1]
10BASE-T	8-polig
100BASE-T	8-polig
Höhere BASE-T	8-polig
IO LINK Klasse A (Master)	5-polig
IO LINK Klasse A (Kabel)	4-polig
IO LINK Klasse A (Gerät)	4-polig oder 5-polig
IO LINK Klasse B	5-polig
USB A 2.0	4-polig
micro USB 2.0	5-polig
CANbus	5-polig
RS-485	4-polig oder 5-polig
RS-422	4-polig oder 5-polig
RS-423	4-polig oder 5-polig
RS-232	8-polig

Ergänzend dazu, sind die platinenmontierbaren und feldkonfektionierbaren Versionen der M12-Rundsteckerfamilie cULus-zertifiziert (UL2238). Alle M12-Steckverbinder gewähren einen Mindestschutz gemäß IP67 oder IP68 gegen das Eindringen von Staub, Schmutz und Wasser.

Schnell und fehlerfrei

Eine schnelle und fehlerfreie Übertragung von digitalen Signalen über Kabel ist für Sensor- und Aktoranwendungen unerlässlich. Basis dafür ist Ethernet Over Twisted Pair (EOTP) als einer der wichtigsten physikalischen Layer für Ethernet. Es dient als Basis für die Protokolle EtherCAT, EtherNet/IP, Profinet, CC-Link IE, Powerlink, Sercos III und Modbus TCP.

M12A ist zwar nicht der ursprünglich vorgesehene Steckverbinder für EOTP-Schnittstellen, aber es ist dennoch möglich, den Verbinder in verschiedenen Anwendungen einzusetzen. So kann der achtpolige M12-Rundsteckverbinder beispielsweise als Ersatz für RJ45 (8P8C Modular Plug) in einem Cat-3-Verkabelungssystem nach ANSI/TIA-568 fungieren, das für 10BASE-T-Ethernet mit 10 Mbit/s zum Einsatz kommt. Das Cat 3-Kabel besteht aus vier verdrehten Paaren mit einer typischen Differenzimpedanz von 100 Ω. **Bild 1** zeigt die empfohlene Zuordnung bei der Verdrahtung eines RJ45 mit einem M12 A-kodierte Rundsteckverbinder. Die empfohlene Verdrahtung eines A-kodierten M12-Rundsteckverbinders mit einem anderen A-kodierten M12-Rundsteckverbinder ist in **Bild 2** dargestellt. Diese weit verbreitete Konfiguration für A-kodierte M12-EOTP-Verkabelung minimiert die unterschiedliche Signalverzögerung zwischen Kontakten desselben Paares.

Obwohl 10BASE-T nur zwei Paare zur Signalübertragung verwendet, ist es nicht ratsam, nur zwei Paare im Kabel und/oder einen vierpoligen A-kodierten Rundsteckverbinder zu verwenden, da dies

Umfangreiches Portfolio

Würth Elektronik eiSos hält die passende M12-A-Verbindungstechnik für Ethernet, industrielle Bussysteme, USB-2.0- und I/O-Link bereit. Bei den Rundsteckverbindern kann der Anwender zwischen THT-gelöteten Stift- und Buchsenversionen für Leiterplatten in horizontaler und vertikaler Ausführung wählen. Zudem gibt es so genannte Panel-Mount-Cable-Lösungen mit Lötkelchen oder vorverdrahtete Varianten. Alle Teile sind als vier-, fünf- und achtpolige Metall- und Kunststoffausführungen mit den Schalttafelanschnitten PG9, M12 und M16 und in der Schutzart IP68 erhältlich. Darüber hinaus stellt Würth Elektronik M12-A-kodierte Kabelkonfektionen in Schutzart IP67 als einseitige Lösung zur Verfügung.

zu Verwechslungen mit anderen weit verbreiteten Anwendungen führen kann. Für die zweipaarige EOTP-Verkabelung wird dagegen ein D-kodierter M12-Stecker empfohlen. Auch andere Fast-Ethernet-Varianten sind möglich, nämlich 100Base-T für Anwendungen bis zu 100 Mbps, die D-kodierte Rundsteckverbinder mit zweipaarigen Kabeln erfordern, oder höheres Base-T für Datenraten bis zu 10 Gbps. Für letztere sind jedoch X-kodierte Rundsteckverbinder mit vierpaarigen Kabeln Bedingung.

Die Frage ist: Lassen sich höher getaktete EOTP-Standards alternativ mit einer M12-A-Kodierung umsetzen, ohne dabei Abstriche hinsichtlich Geschwindigkeit und Signalintegrität hinnehmen zu müssen? Für EOTP-Standards mit 100 Mbit/s ist es möglich, eine Schnittstelle mit einem A-kodierten Rundsteckverbinder zu erstellen, indem die gleiche Pinbelegung wie für 10-BASE-T verwendet wird. Bei der Entwicklung einer solchen Schnittstelle muss die Signalintegrität berücksichtigt werden. Die gesamte Kabelbaugruppe einschließlich der Stecker muss ANSI/TIA-568 genügen. Jedes der Stecker-/Buchsenpaare und das Kabel selbst haben ein Budget für Verluste und Übersprechen, das nicht überschritten werden darf. Es wird empfohlen, die hauptsächlich von der

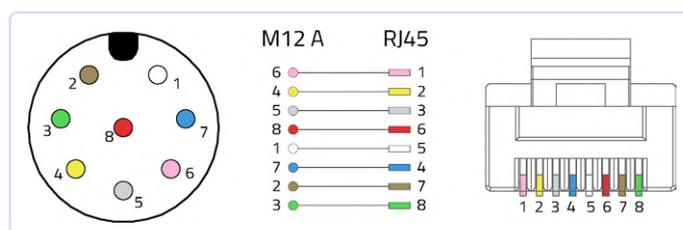


Bild 1. 10BASE-T-Übertragung: Empfehlung für die Verdrahtung eines RJ45-Modularsteckers (8P8C Modular Plug) mit einem A-kodierten M12-Rundsteckverbinder.

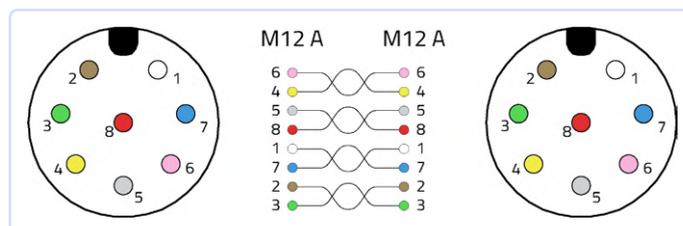


Bild 2. So sieht die empfohlene Anschlussbelegung von M12-A auf M12-A für 10BASE-T-Übertragung aus.

M12-A-Rundsteckverbinderfamilie WR-CIRCM12

Der Fachbeitrag ist aus der Application Note ANE019 von Würth Elektronik eiSos entlehnt und steht zum kostenlosen Download unter www.we-online.de/ane019 zur Verfügung.

Kabelkategorie und der Kabellänge abhängigen Streuparameter einer solchen Verbindung zu testen. Auch bei deutlich höheren Datenraten von bis zu 10 Gbit/s ist es möglich, eine Schnittstelle mit einem M12-Rundsteckverbinder mit A-Kodierung herzustellen, indem die gleiche Pin-Belegung wie bei 10-BASE-T und 100-BASE-T realisiert wird und hierbei die gleichen Überlegungen zur Signalintegrität erfolgen. Eine solche Schnittstelle muss im Allgemeinen aber eine viel kürzere Kabellänge aufweisen.

Weitere Anwendungen

Das Einsatzgebiet für die robusten M12-A-Rundsteckverbinder ist damit noch lange nicht abgedeckt: So lassen sich etwa mit dem Kommunikationssystem IO-Link intelligente Sensoren und Aktoren an ein Automatisierungssystem gemäß IEC 61131-9 clever anbinden, und zwar mit vier- oder fünfpoligen A-kodierten M12-Rundsteckverbindern, die mit einem drei- oder fünfadrigen 20-Meter-Kabel verbunden sind. Der Anschluss an dreiadrigen Kabeln wird als „Klasse A“, der an fünfadrigen Kabeln als „Klasse B“ bezeichnet. Der Geräteanschluss kann über eine feste Kabelverbindung oder eine solche mit vier- oder fünfpoligen M12-Verbindern mit A-Kodierung erfolgen, abhängig von der gewünschten Kreuzkompatibilität. Die M12-Verbindungstechnik ist zweifelsohne als Zwischenglied für Industriebussysteme bestens geeignet, insbesondere für CANbus, RS-485, Profibus sowie die physikalischen Ebenen RS-422, RS-423 und RS-232. Während der CANbus ursprünglich für die Verwendung eines kleinen D-SUB-Steckers konzipiert wurde, ist der fünfpolige A-kodierte M12-Rundstecker eine beliebte Schnittstelle für den CANbus. Nur das CAN_H- und CAN_L-Signalpaar an Pin 4 und Pin 5 ist dabei obligatorisch. In dieser Konfiguration lässt sich ein Gerät auch mit Strom versorgen. Für die elektrische Übertragung kommen verdrehte Signalkabelpaare mit einer nomiellen Impedanz von 120 Ω zum Einsatz.

Die physikalische Ebene RS-485 wird häufig für die Industrieprotokolle Modbus, OSDP, SSCP, SCSI-2, SCSI-3, Profibus, Nanoréseau, DMX 512 und AES 3 verwendet. **Bild 3** zeigt eine für RS-485 typische Anschlussbelegung für fünfpolige A-kodierte Kabel. Alternativ können auch vierpolige geschirmte Leitungen zum Einsatz kommen. Die Verdrahtung hängt größtenteils von der benötigten Stromversorgung ab, umfasst aber immer mindestens das symmetrische TxD/RxD-Paar in Position zwei und vier, um die Signalverzögerung zu minimieren.

Mit Profibus sind nicht nur dezentrale Konzepte möglich. Auch der Umstand, dass Profibus im Baukastenprinzip an unterschiedliche Applikationen anpassbar ist, macht diese Technologie für die Fertigungsautomatisierung und Prozessindustrie attraktiv. Unabdingbar ist dabei die M12-Verbindungstechnik. Während

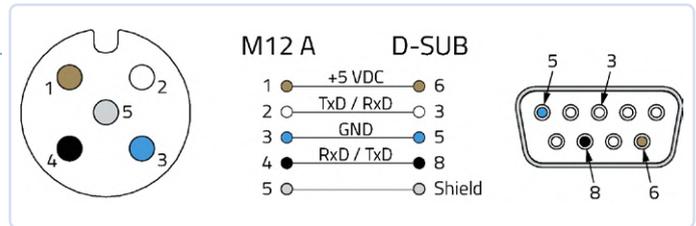


Bild 3. Anschlussbelegung einer fünfpoligen A-kodierten M12-Buchse für eine RS-485-Schnittstelle.

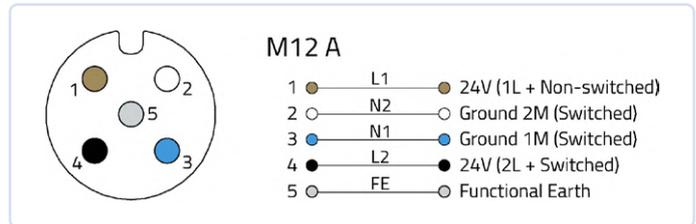


Bild 4. Anschlussbelegung einer 5-poligen A-kodierten M12-Buchse für den Einsatz in Profibus-Peripheriegeräten.

die A-kodierten Varianten der Stromversorgung dienen, sind die B-kodierten Rundsteckverbinder für die Profibus-Signalübertragung ausgelegt (**Bild 4**).

Weitere industrielle Bus-Systeme, in denen die M12-Rundsteckverbinder mit A-Kodierung zur Anwendung kommen, sind RS-411, RS-423 und schließlich auch RS-232. Sowohl acht-, fünf- und vierpolige eignen sich hierfür. Die Verdrahtung hängt hauptsächlich von den benötigten Signalen, der Stromversorgung und der erforderlichen Erdung ab. ◀

240202-02

Über die Autoren



Baptiste Bouix ist Produktmanager International bei Würth Elektronik Frankreich. Seine Aufgabengebiete umfassen Board-to-Board-, Card Connectors und Ethernet-Steckverbinder. Zuvor war er in der Mikroelektronikindustrie in Forschung und Entwicklung von Fertigungsprozessen tätig. Mit Abschlüssen in Materialwissenschaften und Nanotechnik kann er auf eine umfassende Expertise in den Bereichen Siliziumtechnologien, Signalverarbeitung und Messtechnik verweisen und hat sich über die Jahre zum Spezialisten für signalkettenorientiertes Produktmanagement und Design entwickelt.

Caroline Poulard ist Produktmanagerin für Rundsteckverbinder und DSUB-Steckverbinder bei Würth Elektronik Frankreich. Nach ihrem Abschluss als Maschinenbauingenieurin arbeitete sie zunächst in der Automobilindustrie, bevor sie neue Herausforderungen in der Elektronikbranche suchte.



WEBLINK

[1] A-kodierte M12-Steckverbindertypen:

https://www.we-online.com/de/components/products/em/connectors/circular_connectors/circular_connectors_m12_a

Arduino-Messlabor

Ein 8-in-1-Test- und Messgerät für das heimische Elektroniklabor

Von Burkhard Kainka (Deutschland)

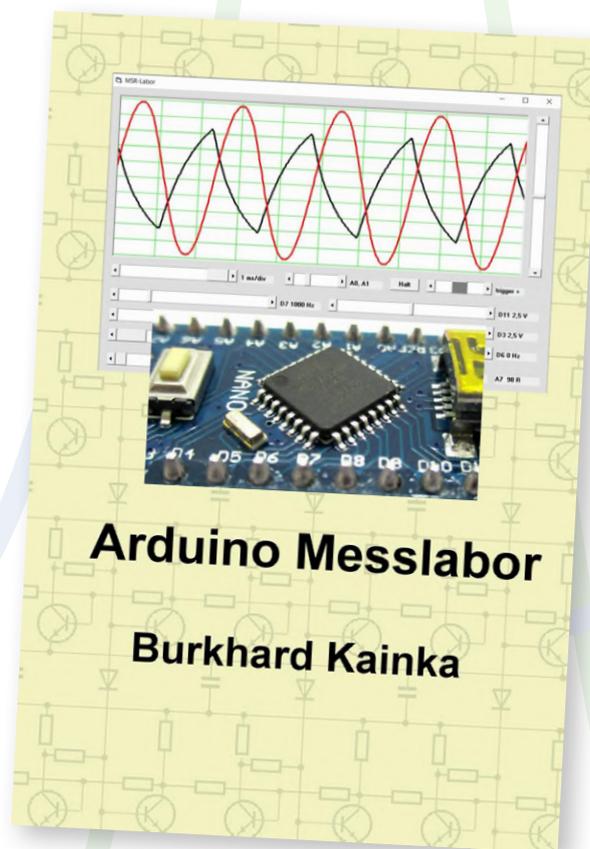
Das Buch mit dem obigen Titel beschreibt eine Reihe von Arduino-gesteuerten Test- und Messgeräten von ihren Funktionsprinzipien bis hin zur praktischen Anwendung, einschließlich der Programmierung und einer fairen Prüfung ihrer Stärken und ihrer Grenzen.

In diesem Artikel tauchen wir in das Buch an einem relativ fortgeschrittenen Punkt ein, an dem einige der grundlegenden Funktionen wie Frequenzerzeugung und Frequenzmessung durch Software verfeinert werden, die auf Präzision und praktische Anwendung im Heimlabor abzielen.

Wenn der Arduino einen Platz in Ihrem Maker-Labor verdient, dann sicher in diesem multifunktionalen All-DIY-Testgerät für den echten Einsatz auf dem Prüfstand!

*Anmerkung der Redaktion: Dieser Artikel ist ein Auszug aus dem Buch Arduino-Messlabor. Dieser Auszug wurde formatiert und leicht bearbeitet, um dem Stil und dem Seitenlayout der Zeitschrift Elektor zu genügen. Das Buch ist in deutscher Sprache im Eigenverlag des Autors und in englischer Übersetzung bei Elektor erschienen. Der Autor und der Herausgeber helfen gerne bei Rückfragen. Informationen finden Sie in den Kästen **Fragen oder Kommentare** und **Passende Produkte**.*

Der Arduino Nano hat noch einiges mehr zu bieten, als bisher im Buch behandelt wurde. Mehrere Ports, Analogeingänge und Timer sind noch frei. Hier wird versucht, alle Möglichkeiten auszuschöpfen, die gleichzeitig genutzt werden können. Das Ziel bleibt beste-



hen, alle Funktionen so zu verwenden, als gehörten sie zu eigenständigen Geräten. Das MSR-Labor wird damit umfangreicher, ohne dass zusätzliche Hardware benötigt wird. Das Ziel der Entwicklung ist eine Kombination verschiedener Funktionen:

- › Oszilloskop mit bis zu zwei Kanälen, umschaltbaren Zeitachsen und Triggerfunktionen
- › Zwei DDS-Sinuswellengeneratoren
- › Zusätzliche DDS-Rechteckwellenausgänge
- › Zwei einstellbare Spannungsquellen

Was die Software betrifft, so finden Sie das MSR-Laborprogramm und weitere Informationen über das Projekt unter [1], ebenso wie weitere Informationen des Autors über seine Veröffentlichung. Für eine gute Übersicht, auch mit viel mehr Ein- und Ausgängen, sind alle Funktionen entsprechend den Pin-Bezeichnungen am Arduino benannt. **Bild 1** zeigt einen Beispielbildschirm des MSR-Labors im laufenden Betrieb und die Pinbezeichnungen auf dem Arduino.

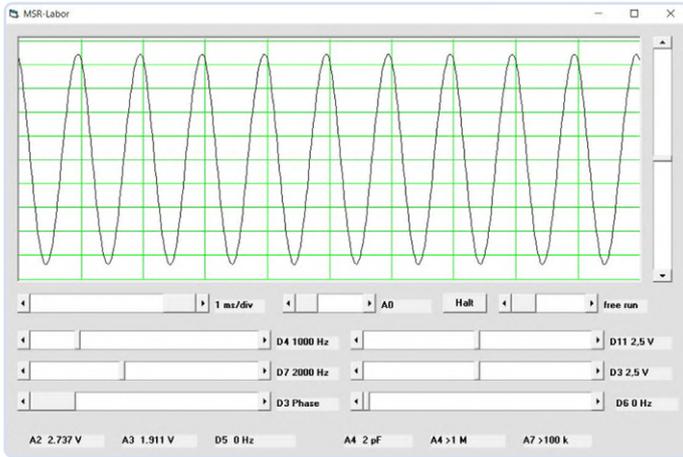


Bild 1. Zusätzliche Funktionen und Anschlussmöglichkeiten für MSR, den Softwarekern des Arduino-Messlabors.

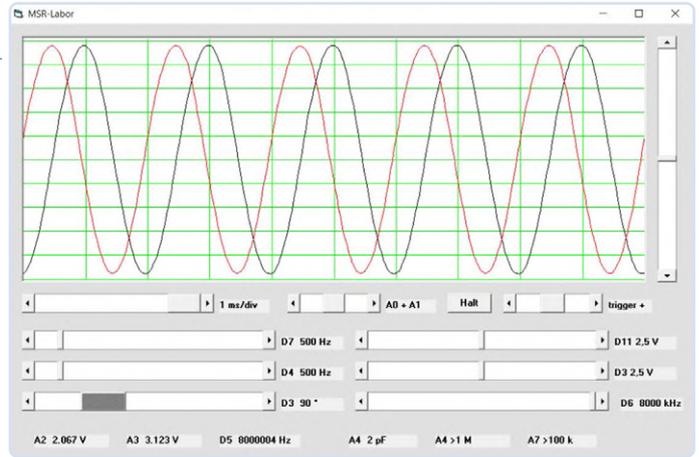


Bild 2. Eine Phasendifferenz von 90 Grad.

Phaseneinstellung der DDS

Die Sinustabelle des DDS-Generators, die bereits im Buch besprochen wurde, hat eine Länge von 256 Bytes. Für eine vollständige Periode muss das High-Byte im Phasenakku den Bereich von 0...255 durchlaufen. Bei gleicher Frequenz auf beiden Kanälen wird also eine Phasenbeziehung von insgesamt 360 Grad in diesem Bereich abgebildet. Entsprechend wird `a1 = 0x0000` gesetzt und ein empfangener Byte-Parameter in das High-Byte von `a2` geschoben. Der Befehl `82` löst damit einen Phasensprung an beiden Kanälen aus, nach dem die gewünschte Phasenlage besteht. **Listing 1** zeigt den entsprechenden Programmcode.

Im Anwenderprogramm wird die gewünschte Phasendifferenz mit dem Schieberegler `HScroll19` eingestellt (**Bild 2**). Bei jeder Betätigung wird der Befehl `82` zusammen mit dem neuen Phasenbyte gesendet.

Signalgenerator bis 8 MHz

Der `Timer0` mit einer Auflösung von 8 Bit kann zur Erzeugung eines symmetrischen Rechtecksignals verwendet werden. Zur Initialisierung wird `TCCR0A = 0x42` gesetzt. Das folgende Register stellt den Vorteiler ein. Mit `TCCR0B = 0x00` ist der Generator abgeschaltet, mit `TCCR0B = 0x01` erhält er die volle Taktfrequenz von 16 MHz. Weitere Vorteiler-Stufen reichen bis zu einem Verhältnis von 1.024. Die genaue Frequenz wird mit `OCR0A = 255 / 256` (niedrigste Frequenz) bis `OCR0A = 0` (/1, höchste Frequenz) eingestellt. Der Zähler zählt aufwärts und springt bei jedem Erreichen von `OCR0A` auf 0. Gleichzeitig wird der Ausgang `OC0A` an Port `D6` umgeschaltet. Dadurch ergibt sich die höchste Frequenz von 8 MHz. Die niedrigste Frequenz beträgt $16 \text{ MHz} / 2 / 1.023 / 256 = 30,528 \text{ Hz}$.

```
TCCR0A = 0x42; // Timer0 Toggle OC0A
TCCR0B = 0x00; // off
OCR0A = 255;
```

Um die Frequenz einzustellen, müssen zwei Bytes für den Vorteiler und den Timer übertragen werden. Zu diesem Zweck wurde der Befehl `90` festgelegt.

```
if (c == 90){ // OC0A frequency
    TCCR0B = USART_Receive();
    OCR0A = USART_Receive();
}
```

Im User-Programm führt jede Änderung am Frequenzregler `HScroll18` zu einem neuen Ausgangswert. Um eine möglichst feinstufige Einstellung zu erreichen, werden fünf Bereiche mit unterschiedlichen Vorteilern (1, 8, 64, 256 und 1.024) verwendet. Die Ausgangsfrequenz wird berechnet und auf der Benutzer-Oberfläche angezeigt. **Listing 2** zeigt den Codeauszug, **Bild 3** die Pinanschlüsse und **Bild 4** den Benutzerbildschirm des MSR-Labors.

Viele wichtige Frequenzen können genau eingestellt werden, aber die meisten Frequenzen sind ungerade Bruchteile von 16 MHz. Die Auflösung ist bei niedrigen Frequenzen hoch und wird zum Ende der Frequenzskala hin gröber. Die vier höchsten Frequenzen sind 2 MHz, 2,667 MHz, 4 MHz und 8 MHz. Zum Vergleich: Der auf diese Weise erstellte DDS-Generator hat eine Auflösung von etwa 1 Hz über den gesamten Bereich, erreicht aber nur 5 kHz.

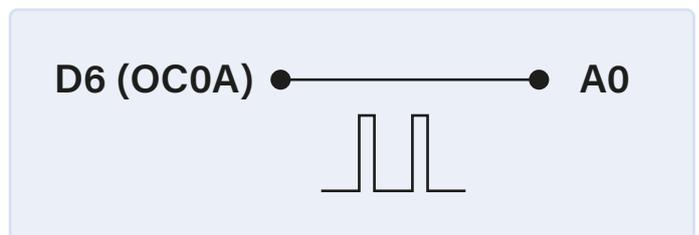


Bild 3. Pin-Anschlüsse für den Frequenzgenerator.



Bild 4. Ausgabe und Anzeige eines 1.000-Hz-Signals.



Listing 1: Auslösen eines Phasensprungs.

```

if (c == 82) { // DDS Phase
    a2 = (USART_Receive()) << 8;
    a1 = 0x0000;
}

Private Sub HScroll9_Change()
    phase = HScroll9.Value
    Label15 = "D3 " + Str(Round(phase / 256 * 360)) + " °"
    SENDBYTE 82
    SENDBYTE phase
End Sub

```



Listing 2: Die Ausgangsfrequenz wird berechnet und angezeigt.

```

Private Sub HScroll8_Change()
    d = HScroll8.Value
    If d = 0 Then pre = 0: n = 0
    If d > 0 Then
        pre = 5
        n = 256 - d
        If n > -1 Then f = 8000000 / 1024 / (n + 1)
    End If
    If d > 192 Then
        pre = 4
        n = 448 - d
        If n > -1 Then f = 8000000 / 256 / (n + 1)
    End If
    If d > 384 Then
        pre = 3
        n = 640 - d
        If n > -1 Then f = 8000000 / 64 / (n + 1)
    End If
    If d > 608 Then
        pre = 2
        n = 864 - d
        If n > -1 Then f = 8000000 / 8 / (n + 1)
    End If
    If d > 832 Then
        pre = 1
        n = 1088 - d
        If n > -1 Then f = 8000000 / (n + 1)
    End If

    If f < 100000 Then Label11.Caption = "D6 " + Str(Round(f))
        + " Hz"
    If f >= 100000 Then Label11.Caption = "D6 " + Str(Round(f
        / 1000)) + " kHz"
    SENDBYTE 90
    SENDBYTE pre
    SENDBYTE n
End Sub

```

You CAN get it...

Hardware und Software
für CAN-Bus-Anwendungen...



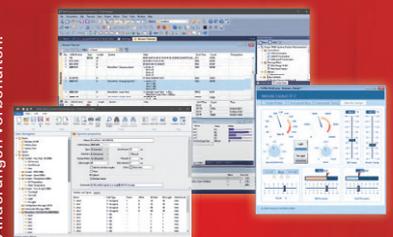
PCAN-MiniDiag FD

Handheld zur grundlegenden
Diagnose von CAN- und
CAN-FD-Bussen. Messung der
Bitrate, Terminierung, Buslast
und Pegel am D-Sub-Anschluss.



PCAN-miniPCIe FD

CAN-FD-Interface für PCI
Express Mini inkl. Software,
APIs und Treiber für Windows
und Linux.



PCAN-Explorer 6

Professionelle Windows-
Software zur Steuerung und
Überwachung von CAN-FD-
und CAN-Bussen.

Irrtümer und technische Änderungen vorbehalten.

www.peak-system.com

Tel.: +49 6151 8173-20
Fax: +49 6151 8173-29
info@peak-system.com

PEAK
System

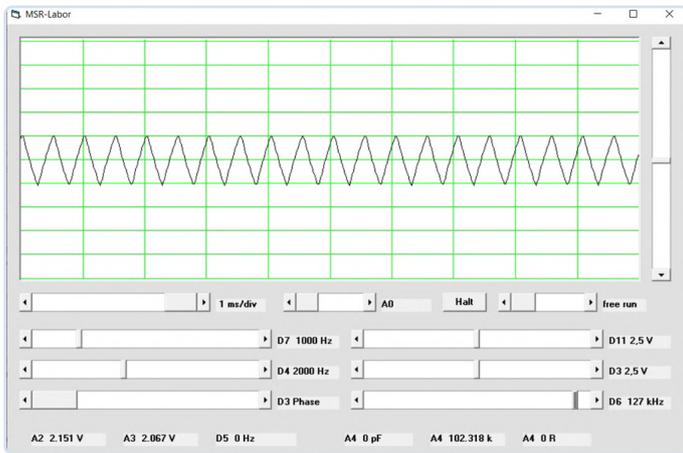


Bild 5. Messung eines 2-kHz-Alias, obwohl es 127 kHz sein sollten.

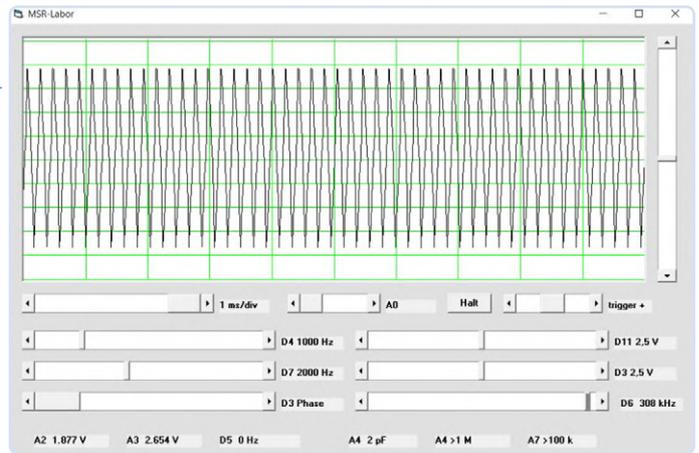


Bild 6. Anzeige eines Dreieckssignals bei 308 kHz.

Mit dem Rechteckgenerator können Frequenzen eingestellt werden, die über die Abtastrate des Oszilloskops hinausgehen. Zuverlässige Messungen mit dem Oszilloskop sind nur bis zur halben Abtastrate möglich, also bis etwa 31 kHz. In der Nähe der Abtastrate oder ihrer Vielfachen werden völlig falsche Bilder geliefert. Die doppelte Abtastrate beträgt 125 kHz. Wenn Sie den Rechteckgenerator auf 127 kHz einstellen, erscheint ein scheinbares Signal von 2 kHz, also die Differenzfrequenz. Dieses Problem kann im Prinzip bei jedem DSO beobachtet werden, während es bei einem Analogoszilloskop nie auftritt. **Bild 5** zeigt ein Beispiel. Auffällig sind auch die schrägen Kanten im Oszillogramm, trotz der eigentlich rechteckigen Form. Sie entstehen durch die begrenzte Abtastzeit des A/D-Wandlers. Der Sample-and-Hold-Kondensator braucht eine gewisse Zeit, um sich auf die tatsächliche Spannung aufzuladen. Bei sehr hohen Frequenzen ändert sich der Zustand jedoch bereits innerhalb der Abtastzeit. Daher werden bei den Übergängen Spannungen zwischen den Extremwerten gemessen. Bei sehr hohen Frequenzen werden sogar dreieckförmige Spannungen wie in **Bild 6** angezeigt.

Frequenzmessung

Der digitale Zähler verwendet den **Timer1** mit einer Auflösung von 16 Bit. Weil man damit nur bis 65.535 zählen kann, wird bei jedem Überlauf ein Interrupt ausgelöst, um einen weiteren Zähler zu erhöhen. Dies widerspricht zwar dem Grundsatz, dass es nur einen aktiven Interrupt geben sollte, um die laufende DDS-Ausgabe nicht zu stören, allerdings tritt der **Timer1**-Interrupt nur sehr selten auf und auch nur dann, wenn Frequenzen über 65 kHz gemessen werden. Das folgende Listing zeigt den entsprechenden Code:

```
ISR (TIMER1_OVF_vect)
{
    fh1++;
}
...
TCCR1A = 0x00;
TCCR1B = 0x07; // Timer1 Input
TIMSK1 = 0x01; // Timer1 Overflow Interrupt
TCCR1C = 0;
```

Zur Initialisierung wird der Zähler mit dem Eingang T1 an Port D5 verbunden. Außerdem wird der Interrupt freigegeben. Der **Timer2**-Interrupt wird zur Steuerung der Torzeit mitverwendet. Hier wird ein Zeitzähler **t** eingerichtet. Bei **t = 0** wird **Timer1** zusammen mit

seinem externen High-Byte **fh1** zurückgesetzt. Bei **t = 1** wird der Timer gestartet. Und genau eine Sekunde später wird er gestoppt und ausgelesen:

```
ISR (TIMER2_OVF_vect)
{
    PORTB |= 1;
    ...
    t++;
    if (t == 0) { TCCR1B = 0x00; TCNT1 = 0; fh1 = 0; }
    if (t == 1) { TCCR1B = 0x07; }
    if (t == 62501) { TCCR1B = 0x00; fh2=TCNT1; fh1=fh2; }
    ...
    PORTB &= ~1;
}
```

Die unteren 16 Bits stehen dann in **f**. Hinzu kommen die oberen 8 Bit in **fh2**. Für die Übertragung zum PC wurde der Befehl **91** definiert. Im Programm MSR-Labor wird die Frequenz einmal pro Sekunde neu angezeigt. Dazu muss der Messwert innerhalb der Timerfunktion ausgelesen werden. Insgesamt drei Bytes werden zu einer 24-Bit-Zahl zusammengesetzt. Hier sind die für diese Operationen relevanten Codeschnipsel:

```
if (c == 91) { // Timer 1 frequency
    USART_Transmit(fh2);
    USART_Transmit(f >> 8);
    USART_Transmit(f & 0xFF);
}
```

```
CLEARBUFFER
SENDBYTE 91
f = READBYTE
f = 256 * f
f = f + READBYTE
f = 256 * f
f = f + READBYTE
Label9 = "D5 " + Str(f) + " Hz"
```

Der Frequenzmesser arbeitet permanent im Hintergrund, ohne die DDS-Ausgabe und das Oszilloskop zu stören. Wenn Sie den Eingang D5 mit dem Ausgang D9 (= B0) verbinden, können Sie die Abtastrate und den regelmäßigen Aufruf der **Timer2**-

Interruptfunktion überwachen (**Bild 7**). Hier werden zuverlässig 62.500 Hz angezeigt (**Bild 8**). Sollte diese Frequenz durch eine Firmware-Erweiterung einmal schwanken oder abfallen, deutet dies auf einen Fehler durch zu lange Verweildauer in der Interruptroutine hin.

Zur Messung der DDS-Frequenz eignet sich am besten der Rechteckausgang D7 oder D4. Hier finden Sie teilweise Abweichungen von einem Hertz, die durch Rundungsfehler verursacht werden. Normalerweise schwankt das niedrigste Digit eines Frequenzzählers, weil die Signalfrequenz meist völlig asynchron zur Zeitbasis des Zählers ist.

In diesem Fall wird die Frequenz von 1 kHz auch durch das Oszilloskop bestätigt, das gleichzeitig das entsprechende Sinussignal misst (**Bild 9**). Das MSR-Oszilloskop kann jedoch nur Frequenzen unter 31 kHz messen, der MSR-Frequenzzähler hingegen arbeitet bis zu 8 MHz.

Bei der höchsten Messfrequenz von 8 MHz wird eine Abweichung von 4 Hz festgestellt (**Bild 10**). Dies ist auf die Berechnungszeit in der Timer2-Funktion zurückzuführen, die eine leichte Verlängerung der Torzeit verursacht. Genauer lässt sich dieser Zeitfehler auf 0,5 μ s eingrenzen.

Insgesamt scheint der Frequenzzähler eine ausgezeichnete Genauigkeit zu haben. Allerdings muss man bedenken, dass alle gemessenen Signale vom gleichen Takt abgeleitet sind, nämlich dem Systemtakt des Arduino. Leider verwendet der Controller keinen Quarz, sondern einen 16-MHz-Keramikresonator. Genaue Messungen zeigen, dass dieser eine Abweichung von bis zu etwa 0,3 % haben kann, was bei 16 MHz etwa 50 kHz entspricht. Bei der angezeigten Frequenz von 8 MHz ist also ein Fehler von bis zu 25 kHz möglich.

Diese Toleranzen müssen bei jeder Frequenzmessung berücksichtigt werden. Es gibt jedoch häufig Aufgaben, bei denen nur die relative Genauigkeit oder die Beobachtung von Frequenzänderungen (Δf) wichtig ist. In anderen Fällen sollte man in Erwägung ziehen, den Keramikresonator zu entfernen und durch einen Quarz (mit passenden Kondensatoren) zu ersetzen. \blacktriangleleft

RG — 240119-02

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Haben Sie Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Senden Sie eine E-Mail an den Autor unter b.kainka@t-online.de oder an Elektor unter redaktion@elektor.de.



Passende Produkte

- \blacktriangleright **Burkhard Kainka, Arduino Messlabor, Eigenverlag 2022**
Buch, Paperback und E-Buch, deutsch:
<https://www.b-kainka.de/Messlabor.html>
- \blacktriangleright **Burkhard Kainka, The Arduino-Inside Measurement Lab, Elektor 2024**
Buch, Paperback, englisch: www.elektor.de/20818
E-Buch, PDF, englisch: www.elektor.com/20819

D8 (62.5 kHz) — D5 (T1)



Bild 7. Pin-Anschlüsse für den Frequenzmesser.

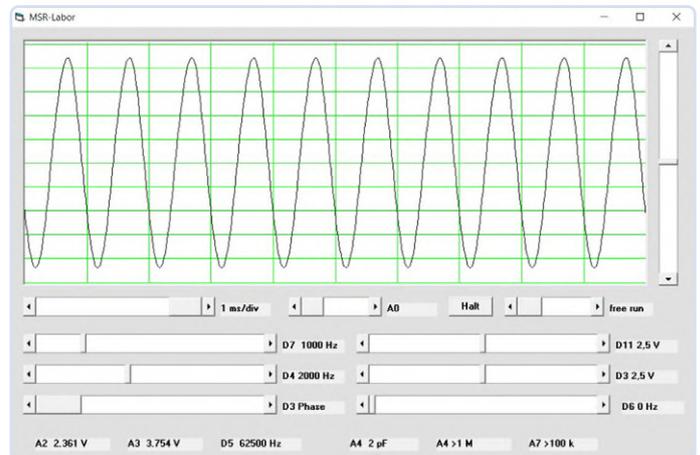


Bild 8. Messung der Abtastfrequenz an D8.

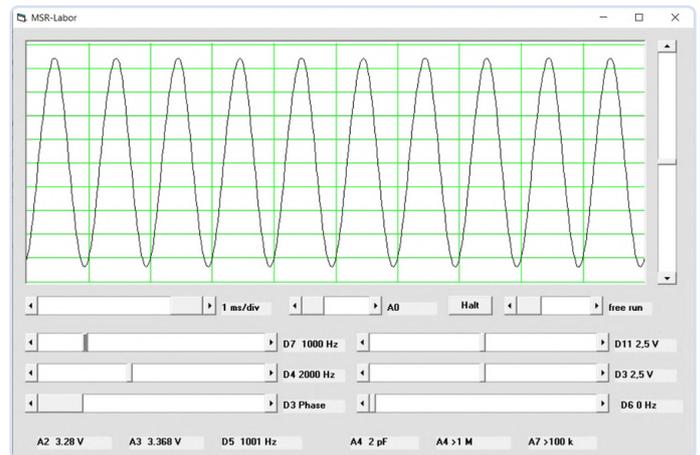


Bild 9. Messung der DDS-generierten Ausgangsfrequenz von 1.000 Hz.

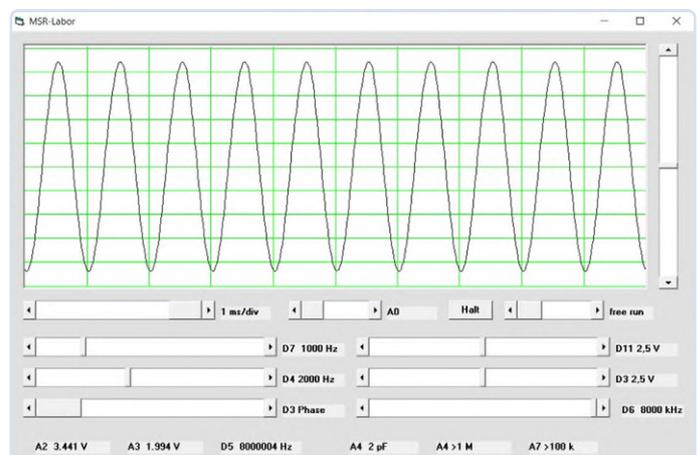


Bild 10. Messung von 8 MHz an D6.

WEBLINK

[1] MSR-Software: <https://b-kainka.de/MeasurementLab.html>

Soundkarte als Betrag/ Phase-Impedanz-Analysator

Für Frequenzen von 100 Hz bis 90 kHz

Von Dr. Martin Ossmann (Deutschland)

Die wenigsten wissen, dass mit der Soundkarte ein phantastisches Messinstrument in ihrem PC steckt. Mit einer passenden Software lassen sich Verstärkung und Phasenverhalten von Vierpolen und die Impedanz von Zweipolen im niederfrequenten Bereich ermitteln – ohne Aufwand und Zusatzkosten.

Dieser Artikel zeigt, wie man mit der Soundkarte den Frequenzgang von Baugruppen nach Betrag und Phase (Gain/Phase) und die Impedanz von Zweipolen (Widerstand, Kondensator, Induktivität) messen kann. Die vorgestellten Programme wurden mit der (Open-Source-) Entwicklungsumgebung Processing [1] realisiert, mit der man gut die Soundkarte ansprechen und Bildschirmgrafiken realisieren kann. Die Programme finden Sie auf der Elektor-Projektseite unter [2].

Um den Frequenzgang einer Baugruppe (Device Under Test, DUT) zu messen, speist man ein Sinussignal mit variabler Frequenz ein und misst die Phasenverschiebung und das Amplitudenverhältnis von Ein- und Ausgang.

Soundkarte

Die Soundkarte besitzt einen Ausgang (Speaker), mit dem man eine Schaltung mit einem Sinussignal versorgen kann (**Bild 1**). Weiterhin ist ein Stereo-Eingang (Line In) vorhanden. Speist man das Eingangssignal des DUT in den linken Eingang und das Ausgangssignal in den rechten, kann man beide Signale gleichzeitig messen und so ihre Phasenverschiebung bestimmen. Die Soundkarte des verwendeten PCs hat eine Abtastrate von 192 kHz und eine Auflösung von 16 Bit. Damit kann man Messungen bis zur halben Abtastrate, also etwa 90 kHz vornehmen. Es ist also durchaus möglich, beispielsweise DCF77-Antennen zu vermessen. Die relativ hohe Auflösung ermöglicht auch die Messung relativ schwacher Signale.

Um Messungen durchzuführen, muss die Soundkarte so konfiguriert werden, dass das Ausgangssignal des Signalgenerators auf den

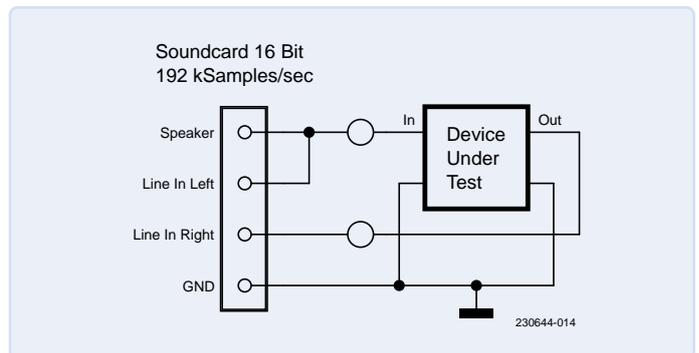


Bild 1. Anschluss eines Vierpols an die Soundkarte.

Speaker-Ausgang geleitet wird und die Line-In-Signale die einzigen sind, die an den A/D-Wandler der Soundkarte gelangen.

Betrag und Phase

Am Eingang der Soundkarte liegt ein Signal mit bekannter Frequenz, aber unbekanntem Betrag und unbekannter Phase. Das Signal (gelbe Spur in **Bild 2**) enthält zudem noch Störsignale/Rauschen. Um Betrag und Phase zu bestimmen, löst man ein lineares Optimierungsproblem. Man bestimmt die Amplituden A und B so, dass das Signal

$$s(t) = A \cos(k \alpha) + B \sin(k \alpha)$$

das Messsignal $y(t)$ möglichst gut trifft. Dazu wendet man die Fehlerquadratmethode an. Es hat sich bewährt, $N = 4096$ Abtastwerte zu benutzen. Das ist im Programm relativ leicht umsetzbar. Um A zu bestimmen, multipliziert und summiert man das Signal mit der abgetasteten Cosinusschwingung. Für B benutzt man entsprechend die abgetastete Sinusschwingung. Der Wert A ist sozusagen der Cos-Anteil, der

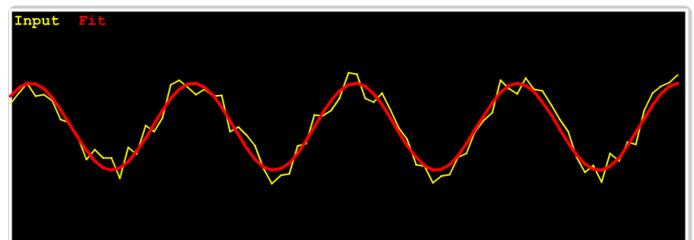


Bild 2. Eingangssignal $y(t)$ (gelb) und Cosinus/Sinus-Näherung $s(t)$ (rot).

Wert B der Sinusanteil des Signals. Das entspricht genau der Wirkungsweise des I/Q-Mischers beim SDR-Empfänger, wo das Eingangssignal ja auch mit Cos und Sin multipliziert wird. Danach erfolgt eine Tiefpassfilterung, was hier als Summation über die Samples gemacht wird, was der Filterung durch den Mittelwert entspricht.

Die Amplitude U und die Phase φ bestimmen sich dann einfach anhand der folgenden Gleichungen

$$U = \sqrt{A^2 + B^2} \text{ and } \varphi = \arctan(B/A)$$

Will man die komplexe Wechselstromrechnung verwenden, ist A der Real- und B der Imaginärteil der Zeigerdarstellung des Signals. Das approximierende Signal s ist in Bild 2 rot dargestellt. Aus dem verbleibenden Approximationsfehler zwischen dem Signal y(t) und der Annäherung s(t) kann man übrigens die Güte der Messung ableiten. Ist der Fehler zu hoch, sollte man die Messung nicht verwerten. Das Programm gibt die relativen Approximationsfehler von Eingangs- und Ausgangssignal aus, beide sollten unter 50 % liegen. Dass eine Messung stark verrauscht ist, liegt oft daran, dass der Pegel zu klein ist. Um das zu vermeiden, kann man sich mit dem Programm auch Eingangs- und Ausgangspegel anzeigen lassen. Damit erkennt man zum Beispiel auch, ob der Signalgenerator eventuell überlastet ist. Aus den Werten von Betrag und Phase von Ein- und Ausgangssignal kann man leicht Betrag und Phase der Übertragungsfunktion g bestimmen. Man bildet den Quotienten der Beträge und die Differenz der Phasen. Im Folgenden wird ein Beispiel gezeigt.

Bandpass

Als DUT dient ein zweistufiger Bandpass (Schaltung in **Bild 3**, Aufbau auf Lochraster in **Bild 4**), der aus einer Reihenschaltung von zwei Bandpässen leicht unterschiedlicher Resonanzfrequenz besteht. In **Bild 5** sieht man Betrag (in dB) und Phase (in Grad) im Bereich von 1 kHz bis 90 kHz. Man kann gut das flache Maximum um die Resonanzfrequenz $f_0 = 17$ kHz herum erkennen. Die Phasendrehung spielt sich hauptsächlich in der Nähe der Resonanzfrequenz ab. Die Kurven stimmen sehr gut mit LTspice-Simulationen überein.

Impedanzbestimmung

Um Impedanzen zu bestimmen, baut man aus der unbekanntem Impedanz Z und einem Quellwiderstand Rq einen Spannungsteiler (**Bild 6**). Der (komplexe) Übertragungsfaktor dieses Spannungsteilers ist einfach:

$$g = Z / (Rq + Z)$$

So, wie man aus der Impedanz Z den Faktor g bestimmen kann, lässt sich umgekehrt aus dem Faktor g die Impedanz Z berechnen

$$Z = Rq \cdot g / (1 - g)$$

So kann man die Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz berechnen, im Gegensatz zu einfachen Impedanzmetern, die nur bei einer festen

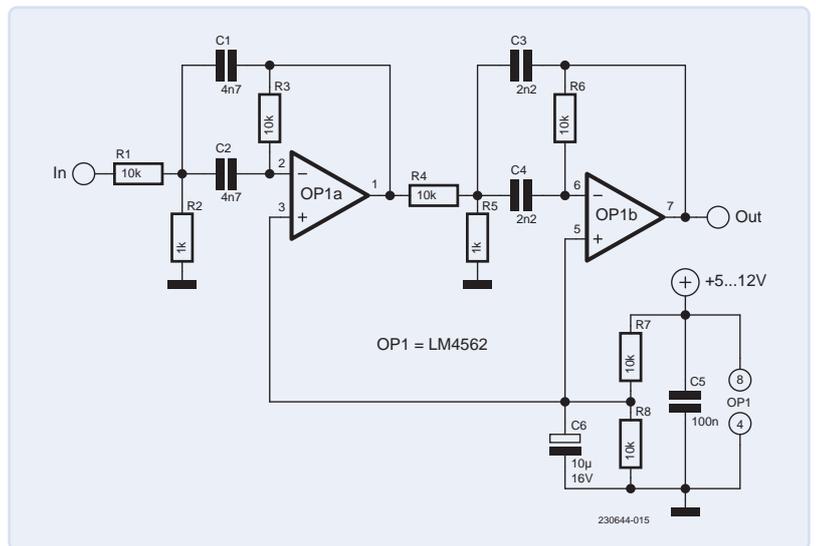


Bild 3. Zweistufiger Bandpass.

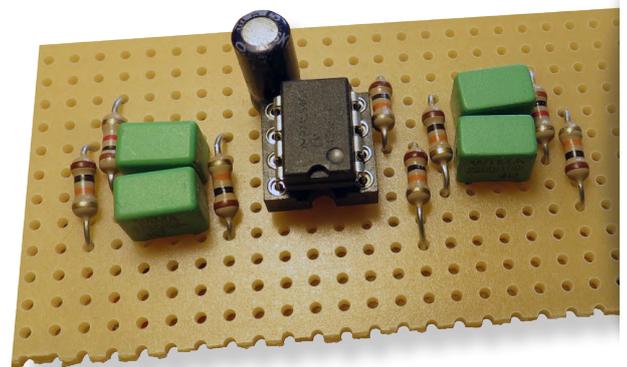


Bild 4. Lochraster-Aufbau des zweistufigen Bandpasses.

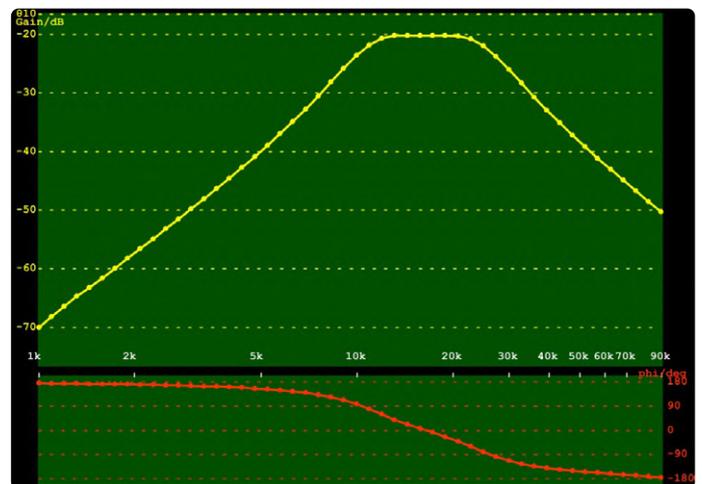


Bild 5. Frequenzgang des Bandpasses nach Bild 3.

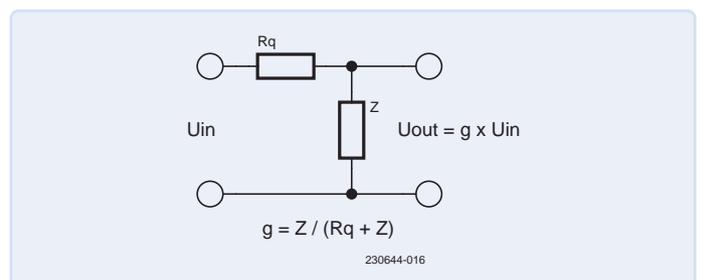


Bild 6. Spannungsteiler zur Impedanzbestimmung.

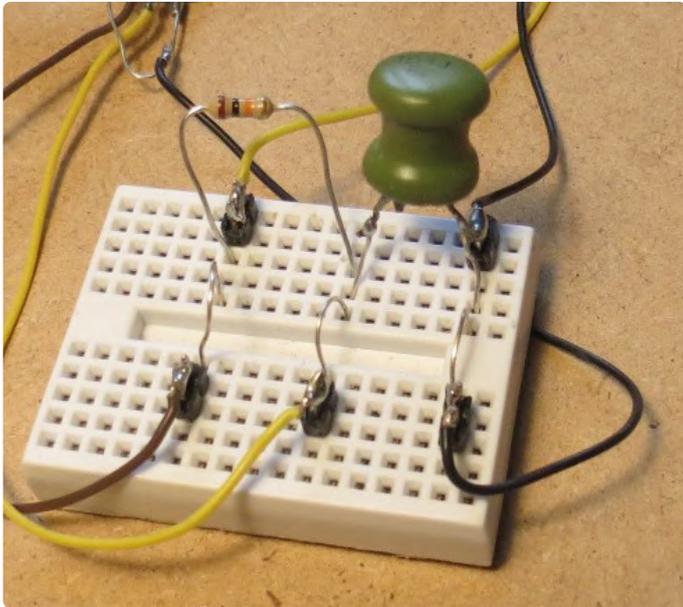


Bild 7. Steckfelddaubau zur Induktivitätsmessung.

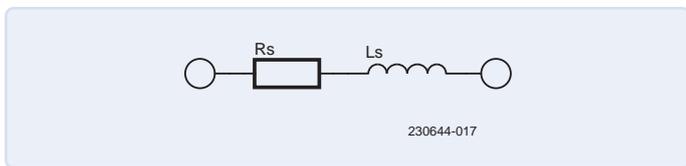


Bild 8. Serienerersatzschaltbild der Induktivität.

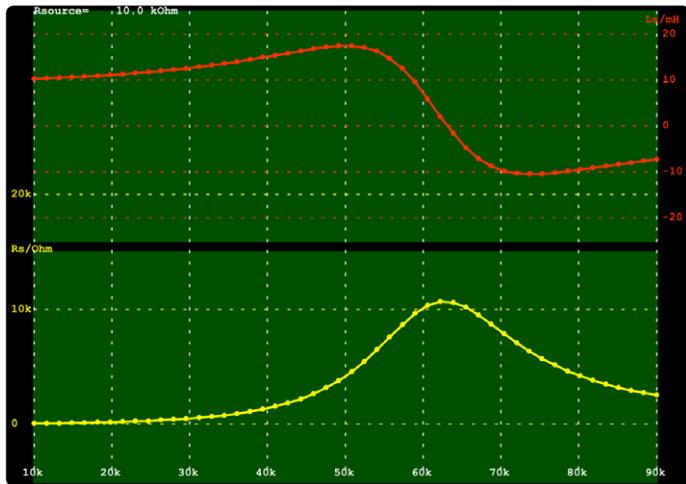


Bild 9. Spulenparameter L_s und R_s von 10 kHz bis 90 kHz.

Frequenz arbeiten. Man erhält die Impedanz in Real- und Imaginärteil oder nach Betrag und Phase aufgesplittet und kann daraus die Komponenten eines Ersatzschaltbildes bestimmen, das uns dann die Kapazität beziehungsweise Induktivität liefert. Der Quellwiderstand R_q sollte so gewählt werden, dass er in der Größenordnung der zu messenden Impedanz liegt. Er sollte auch nicht zu klein sein, weil dann der Signalgenerator überlastet wird.

Zuerst wird die Messung an einer Spule von $L = 10$ mH durchgeführt. Der Aufbau auf einem kleinen Steckbrett ist in **Bild 7** zu sehen. Der Quellwiderstand beträgt $R_q = 10$ k Ω . Als Ersatzschaltbild wird eine Reihenschaltung wie in **Bild 8** angenommen. Der Serienwiderstand repräsentiert dabei den Gleichstromwiderstand des Spulendrahtes sowie die (frequenzabhängigen) Verluste im Kernmaterial und ähnliches. In **Bild 9** sind die frequenzabhängigen Werte des Ersatzschaltbildes dargestellt.

Eingangsimpedanz

Die Frequenzabhängigkeit der Werte weist auf ein Problem hin. Bei Frequenzen kleiner 30 kHz ist zwar der Wert der Serieninduktivität L_s von etwa 10 mH wie zu erwarten gering, Gleiches gilt für den Serienwiderstand R_s . Aber für höhere Frequenzen wächst L_s stark an und wird dann sogar negativ. Das heißt: Bei hohen Frequenzen verhält sich der Zweipol kapazitiv. Der Grund dafür ist die Eingangsimpedanz der Soundkarte, die parallel zu Z liegt. Diese Impedanz kann das System aber selbst messen, indem man bei dem Spannungsteiler nach Bild 6 die Impedanz Z weglässt, so dass sie nur von der Eingangsimpedanz gebildet wird. Als Ersatzschaltbild für die Eingangsimpedanz wird ein Parallelerersatzschaltbild aus Kondensator C_p und Widerstand R_p verwendet. Die resultierenden Messwerte sieht man in **Tabelle 1**. Wie man erkennt, ist die Soundkarte mit circa 11 k Ω relativ niederohmig. Die Impedanz hat einen kapazitiven Anteil von ungefähr 650 pF, was - verglichen mit Oszilloskopen - beträchtlich ist. Dieser kapazitive Anteil hat in der obigen Messung der Induktivität für die Resonanz gesorgt.

Tabelle 1. Messwerte für die Eingangsimpedanz der Soundkarte.

k= 0	frq= 1,00 kHz	$R_p= 12,462$ k Ω	$C_p= 713,40$ pF
k= 1	frq= 12,13 kHz	$R_p= 12,044$ k Ω	$C_p= 647,35$ pF
k= 2	frq= 23,25 kHz	$R_p= 11,591$ k Ω	$C_p= 633,22$ pF
k= 3	frq= 34,38 kHz	$R_p= 11,094$ k Ω	$C_p= 624,68$ pF
k= 4	frq= 45,50 kHz	$R_p= 10,582$ k Ω	$C_p= 618,75$ pF
k= 5	frq= 56,63 kHz	$R_p= 10,049$ k Ω	$C_p= 614,45$ pF
k= 6	frq= 67,75 kHz	$R_p= 9,514$ k Ω	$C_p= 610,30$ pF
k= 7	frq= 78,88 kHz	$R_p= 8,984$ k Ω	$C_p= 606,95$ pF
k= 8	frq= 90,00 kHz	$R_p= 8,387$ k Ω	$C_p= 605,17$ pF

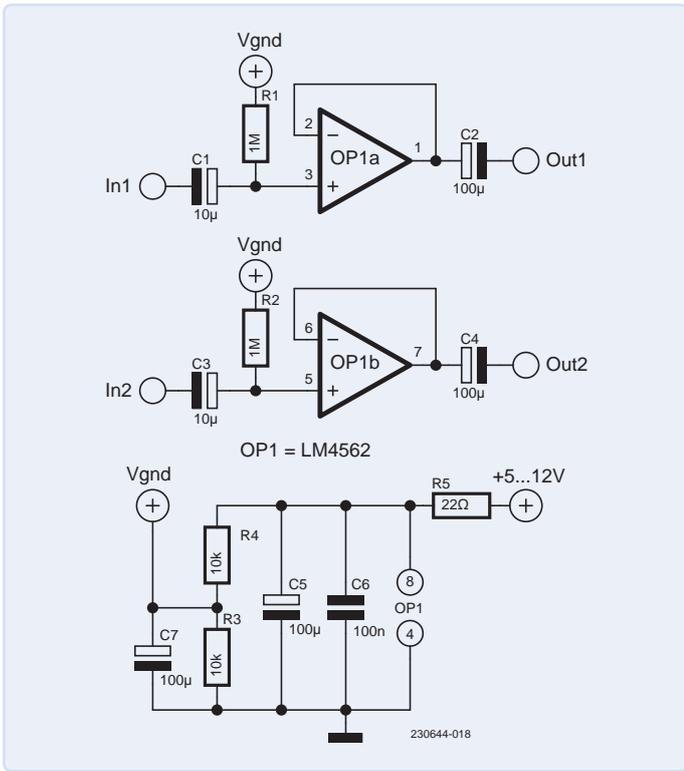


Bild 10. Zweikanaliger Buffer.

Impedanzwandler

Es empfiehlt sich, wegen dieser niedrigen Impedanz Impedanzwandler vorzuschalten. Hochohmige Eingänge mit kleinem kapazitivem Anteil kann man leicht mit Buffer-Verstärkern realisieren. In **Bild 10** ist ein Vorschlag mit dem Opamp LM4562 gezeigt, der leicht auf einem Stück Lochraster aufgebaut werden kann (**Bild 11**).

Der verwendete Opamp LM4562 weist einen nur geringen Biasstrom auf, so dass der Spannungsabfall an den 1-MΩ-Eingangswiderständen klein ist. Das Verstärkungs/Bandbreitenumprodukt ist mit 55 MHz ausreichend hoch; zudem ist der Opamp rauscharm und sehr linear. Er ist zum Beispiel bei Reichelt für 2,30 € preiswert erhältlich.

Die Verschaltung von Buffer, Soundkarte und DUT ist in **Bild 12** dargestellt. Vor jedem Eingang der Soundkarte befindet sich nun eine Buffer-Stufe.

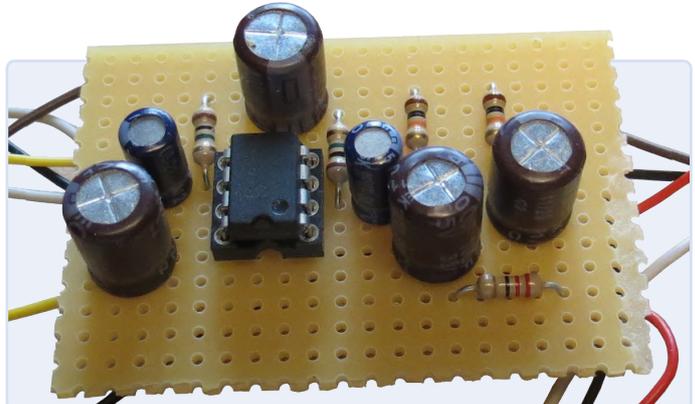


Bild 11. Zweifacher Buffer-Verstärker.

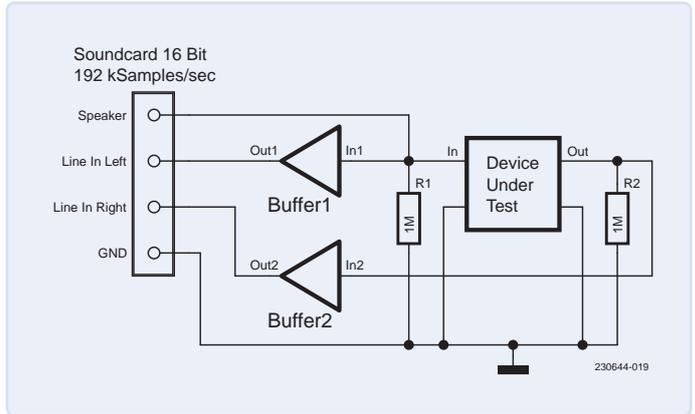


Bild 12. Buffer-Verschaltung mit Soundkarte und DUT.

Da sie für beide Kanäle gleich sind, hebt sich der Einfluss bei der Berechnung des Übertragungsfaktors g auf. Die Bufferstufen haben einen 1-MΩ-Eingang wie Oszilloskope, so dass man jetzt auch normale Oszilloskop-Tastköpfe anschließen kann.

Mit den Bufferstufen wird jetzt eine Parallelschaltung aus einem Widerstand von $R_p = 10\text{ k}\Omega$ und einem Kondensator von $C_p = 100\text{ pF}$ vermessen. Die Resultate sind in **Tabelle 2** dargestellt.

Tabelle 2. Messung einer Parallelschaltung mit $R_p = 10\text{ k}\Omega$ und $C_p = 100\text{ pF}$.

k= 0	frq= 1,00 kHz	Rp= 9,831 kΩ	Cp= 104,31 pF
k= 1	frq= 10,89 kHz	Rp= 9,828 kΩ	Cp= 102,55 pF
k= 2	frq= 20,78 kHz	Rp= 9,827 kΩ	Cp= 102,42 pF
k= 3	frq= 0,67 kHz	Rp= 9,821 kΩ	Cp= 102,49 pF
k= 4	frq= 40,56 kHz	Rp= 9,816 kΩ	Cp= 102,47 pF
k= 5	frq= 50,44 kHz	Rp= 9,809 kΩ	Cp= 102,51 pF
k= 6	frq= 60,33 kHz	Rp= 9,800 kΩ	Cp= 102,60 pF
k= 7	frq= 70,22 kHz	Rp= 9,792 kΩ	Cp= 102,56 pF
k= 8	frq= 80,11 kHz	Rp= 9,780 kΩ	Cp= 102,53 pF
k= 9	frq= 90,00 kHz	Rp= 9,761 kΩ	Cp= 102,20 pF

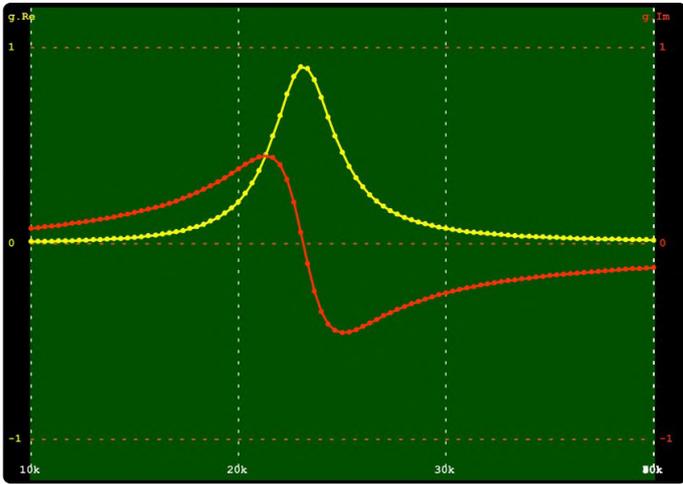


Bild 13. Real- und Imaginärteil für einen Parallelschwingkreis $L_p = 10 \text{ mH}$ und $C_p = 4,7 \text{ nF}$.

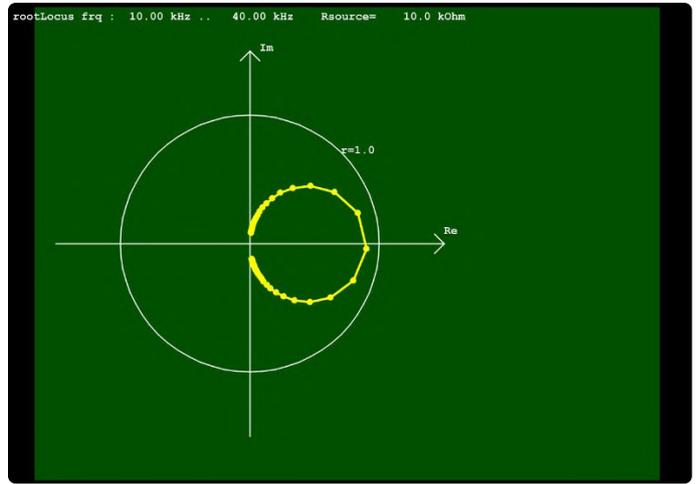


Bild 14. Ortskurve des Parallelschwingkreises.

Man sieht, dass die Messung im gesamten Frequenzbereich wegen der hohen Eingangsimpedanz und einer niedrigen Kapazität der Bufferstufen ziemlich genau ist. Man kann auch Real- und Imaginärteil der Übertragungsfunktion einer Baugruppe ermitteln. Für einen Parallelschwingkreis aus $L_p = 10 \text{ mH}$ und $C_p = 4,7 \text{ nF}$ ist das Ergebnis in **Bild 13** dargestellt.

Real- und Imaginärteil lassen sich wie in **Bild 14** auch in der x-y-Ebene darstellen. Das Ganze nennt sich dann Ortskurvendarstellung. Bei einem Parallelschwingkreis ergibt sich ein Kreis.

Referenzkurven

Oft hat man eine Vorstellung davon, wie die gemessenen Kurven aussehen sollten. Die vorliegende Software gestattet es, solche Vergleichskurven einzublenden, so dass man überprüfen kann, wie gut das Modell mit der Realität übereinstimmt. Für die komfortable Erstellung von Referenz-Übertragungsfunktionen ist eine Bibliothek zur komplexen Wechselstrom-Berechnung sehr vorteilhaft und auch im Download zum Projekt vorhanden. Als Beispiel wird ein Serienschwingkreis (**Bild 15**) vermessen.

Bei der Resonanzfrequenz erzeugt der Serienschwingkreis eine hohe Ausgangsspannung. Wählt man die normale Signalgenerator-Amplitude, wird die Spannungsmessung übersteuert. Als Abhilfe reduziert man einfach die Amplitude des Eingangssignals um den Faktor 10. Jetzt macht sich positiv bemerkbar, dass die Soundkarte auch kleine Signale sehr genau verarbeiten kann. Die Messung der Übertragungsfunktion (Betrag und Phase) ergibt die Kurven, die man in **Bild 16** sieht.

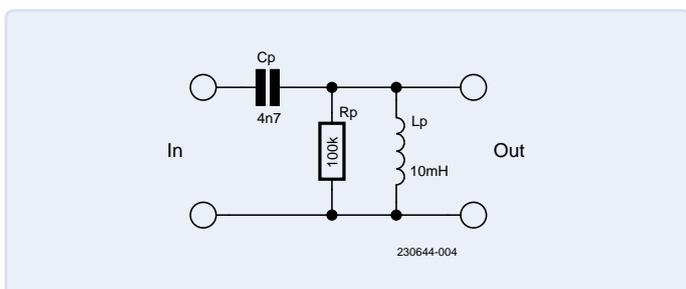


Bild 15. Serienschwingkreis.

Die gelbe Kurve stellt den Betrag der Übertragungsfunktion dar. Man erkennt gut die Resonanzüberhöhung von etwa +30 dB. Die Kurve erstreckt sich über den Bereich von -50 dB bis +30 dB, was einen Dynamikumfang von immerhin 80 dB bedeutet. Die rote Kurve unten zeigt den Phasenverlauf. Die Phase dreht im Wesentlichen im Resonanzbereich. Die grau/blauen Kreuzchen zeigen den Verlauf der Modellfunktion, die zu **Bild 15** gehört. Man sieht, dass diese ziemlich gut passt. Nur die Resonanz ist in der Praxis niedriger als in der Theorie, was an den zusätzlichen Verlusten in der Spule liegt. Verringert man den Wert von R_p auf $30 \text{ k}\Omega$, erhält man eine Kurve, die auch im Resonanzbereich sehr genau stimmt. Daraus kann man die Verluste in der Spule abschätzen. Dies ist auch eine übliche Vorgehensweise bei der sogenannten Parameterschätzung, wobei man die Parameter so justiert, dass die Modellfunktion möglichst gut mit der realen Messung übereinstimmt.

Optionen

Um die Messoptionen darzustellen, sind in **Tabelle 3** die Parameter angegeben, die man im Programm einstellen kann. Man sieht die dadurch erreichbare Vielfalt.

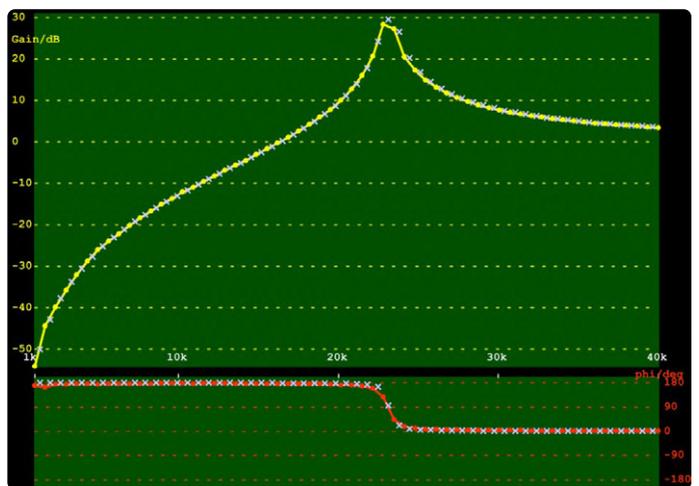


Bild 16. Betrag und Phase der Übertragungsfunktion eines Serienschwingkreises.



Der vorliegende Artikel hat gezeigt, wie man mit einer gewöhnlichen Soundkarte, eventuell erweitert um zwei Opamp-Impedanzwandler, Frequenzgänge von Vierpolen und Impedanzen im Frequenzbereich von 100 Hz bis 90 kHz vermessen kann. Das Processing-Programm erlaubt die Anzeige der frequenzabhängigen Parameter für die verschiedenen Ersatzschaltbilder in den verschiedenen Darstellungsformen. Mit wenig Aufwand kann man so beispielsweise Vierpole, Kondensatoren und Spulen für verschiedene Frequenzen vermessen. ◀

RG — 230644-02

Tabelle 3. Die wichtigsten Programm-Parameter.
Auswahl der Auswertefunktion

<code>selectGreGim</code>	Real- und Imaginärteil der Übertragungsfunktion
<code>selectZreZim</code>	Real- und Imaginärteil der Impedanz
<code>selectRpCp</code>	Ersatzimpedanz Kondensator Cp parallel zum Widerstand Rp
<code>selectRsLs</code>	Ersatzimpedanz Induktivität Ls in Reihe zum Widerstand Rs
<code>selectGainPhase</code>	Betrag (dB) und Phase (Grad) der Übertragungsfunktion
<code>selectGasXY</code>	Real- und Imaginärteil der Übertragungsfunktion als Ortskurve
<code>selectErr</code>	Fehlerlevel für die Sinus-Approximation beider Sample-Sequenzen
<code>selectRms</code>	Amplitude (RMS) der beiden Signale
<code>fSample=192000 ;</code>	Abtastrate der Soundkarte
<code>nSamples=512 ;</code>	Anzahl der Samples bei einer Messung
<code>frqStart=5*kHz ;</code>	Startfrequenz für den Sweep
<code>frqStop= 80*kHz ;</code>	Stoppfrequenz für den Sweep
<code>FrqNsteps=16 ;</code>	Anzahl der Messpunkte beim Sweep
<code>logSweep=!true ;</code>	Option logarithmischer Sweep
<code>SigGenAmplRms=0.25 ;</code>	Amplitude des Sinusgenerators
<code>Rsource=150*0hm ;</code>	Quellwiderstand zur Impedanzmessung

Über den Autor

Martin Ossmann begann im Alter von zwölf Jahren Elektor zu lesen - und zu tüfteln, versteht sich. Nach dem Studium der Elektrotechnik und mehrjähriger Tätigkeit als Entwicklungsingenieur war er Professor am Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik an der FH Aachen. Er ist nicht nur Autor wissenschaftlicher Publikationen, sondern veröffentlicht seit mehr als drei Jahrzehnten regelmäßig Schaltungen und Softwareprojekte mit viel technischem Know-how in Elektor.

Sie haben Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Anmerkungen zu diesem Artikel? Bitte wenden Sie sich per E-Mail an den Autor unter ossmann@fh-aachen.de oder die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.



Passende Produkte

- > Peak Atlas LCR45 - LCR-Meter mit LCR-Impedanzmessung
www.elektor.de/17563



WEBLINKS

- [1] Processing: <https://processing.org>
- [2] Elektor-Projektseite: <https://www.elektormagazine.com/230644-02>
- [3] Mouser Electronics: <https://www.mouser.co.uk/c/?q=LM4562>

pH-Wert-Messung mit dem Arduino UNO R4

Überprüfen Sie die Qualität Ihres Wassers

Von Boris Landoni (Italien)

Wenn Sie den Säuregrad (oder die Alkalinität) Ihres Schwimmbeckens oder Aquariums wissen wollen, brauchen Sie ein pH-Meter. In diesem Artikel finden Sie eine einfache, aber effektive Lösung, die auf handelsüblichen Bauteilen basiert.

Electronica In
WWW.ELETRONICA.IT

In diesem Artikel stellen wir ein pH-Meter vor, das den pH-Wert einer Lösung genau messen kann. Wir verwenden dazu einen speziellen Sensor, das Arduino-UNO-R4-Minima-Board und ein kleines 0,96-Zoll-OLED-Display. Dank seiner Vielseitigkeit kann dieses System in verschiedenen Bereichen eingesetzt werden und liefert zuverlässige Ergebnisse auf eine benutzerfreundliche Weise.

Wasser ist in vielen Zusammenhängen ein entscheidender Faktor. In der hydroponischen Landwirtschaft zum Beispiel, wo Pflanzen ohne Erde angebaut werden, spielt der pH-Wert des Wassers eine Schlüsselrolle für die optimale Nährstoffaufnahme der Pflanzen. Die ständige Überwachung des pH-Werts des Wassers ermöglicht es Landwirten und Betreibern, den Säure- oder Alkaligehalt anzupassen und so ein ideales Umfeld für das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen zu schaffen. Aber nicht nur die hydroponische Agrarwirtschaft profitiert von diesem Projekt. Die Aufrechterhaltung des korrekten pH-Werts des Wassers ist beispielsweise auch bei der regelmäßigen Wartung von Schwimmbädern von wesentlicher Bedeutung - eine Voraussetzung, um den Badegästen eine gesunde, sichere und stets schwimmerfreundliche Bade-Um-

gebung zu bieten. Ein unausgewogener pH-Wert kann zu Augen- und Hautreizungen bei den Badegästen führen und die Vermehrung von Bakterien und Algen fördern.

Darüber hinaus findet dieses pH-Messsystem auch bei Aquarien Anwendung, wo die Wasserqualität für die Gesundheit der Fische und aller anderen im Aquarium lebenden Lebewesen von entscheidender Bedeutung ist. Ein falscher pH-Wert kann das Gleichgewicht des aquatischen Ökosystems stören und Stress und Krankheiten bei den Bewohnern in ihrem Lebensraum verursachen. Man stelle sich vor, die Luft, die wir alle atmen müssen, wäre mit Feinstäuben und gesundheitsschädlichen Abgasen verunreinigt. Würden Sie sich das gefallen lassen? Mit diesem pH-Messgerät können Sie den pH-Wert des Wassers in Echtzeit überwachen und eventuelle Korrekturen vornehmen, um einen idealen Wert für jede Anwendung zu gewährleisten.

Was ist der pH-Wert?

Bevor es an die Elektronik geht, sollten wir uns ansehen, was der pH-Wert überhaupt ist. Der pH-Wert (Wasserstoffpotenzial, englisch: potential of Hydrogen) ist eine Messskala, die den Grad der Säure oder Alkalität einer

Lösung angibt. Diese Skala reicht von 0 bis 14, wobei ein Wert von 7 Neutralität bedeutet, während Werte unter 7 Säure und Werte über 7 Alkalität anzeigen (**Bild 1**).

Der pH-Wert wird durch die Konzentration der in der Lösung vorhandenen Wasserstoffionen (H^+) bestimmt. Wenn sich ein Stoff in Wasser auflöst, kann er Wasserstoffionen freisetzen, die den Säuregrad der Lösung bestimmen. Wenn die Konzentration dieser Ionen hoch ist, ist der pH-Wert niedrig, was auf einen sauren Zustand hinweist. Umgekehrt ist der pH-Wert hoch, wenn die Wasserstoffionenkonzentration niedrig ist, was auf Alkalität hindeutet. Wie bereits erwähnt, ist der pH-Wert ein wichtiger Parameter in vielen wissenschaftlichen und industriellen Bereichen. Aber auch für die menschliche Gesundheit ist er von grundlegender Bedeutung, da verschiedene biologische Systeme eine Umgebung mit einem bestimmten pH-Wert benötigen, um richtig zu funktionieren. Die Messung des pH-Werts kann mit chemischen Indikatoren (Lackmus-Papier) oder mit elektronischen Instrumenten, den so genannten pH-Metern, erfolgen, die den pH-Wert einer Lösung genau ablesen und in Chemielabors und bei der Umweltanalyse eingesetzt werden.

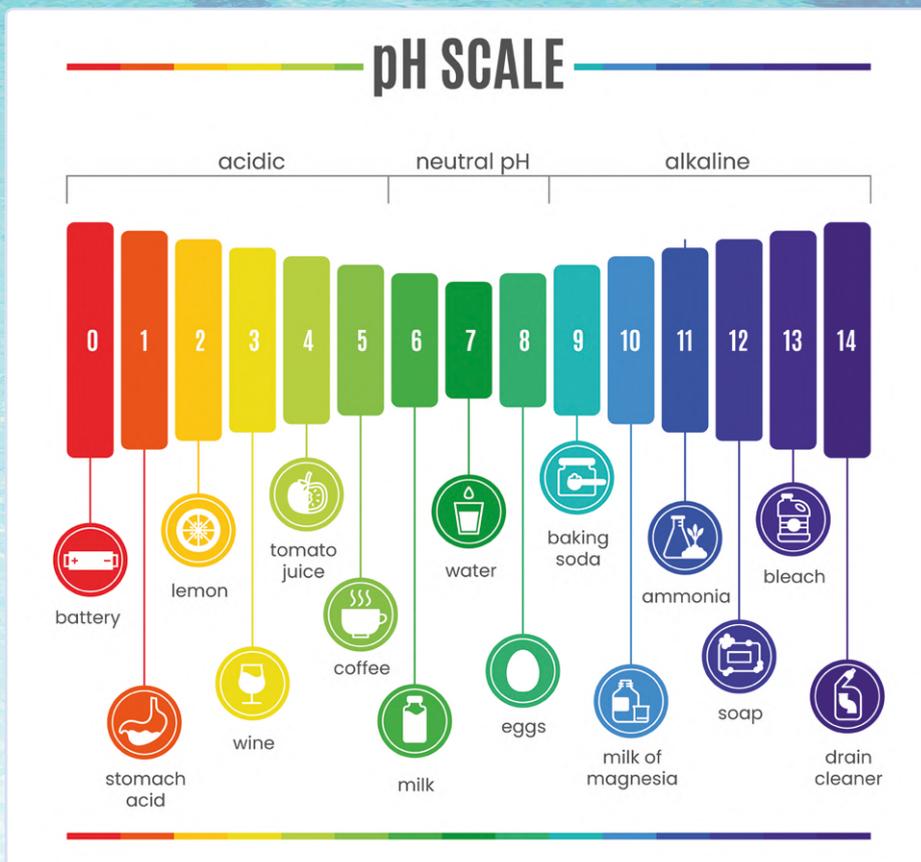


Bild 1. Die Skala zur Angabe des Säure- oder Alkalitätsgrades einer Lösung. (Quelle: Freepik / @freepik)

Sensor zur pH-Messung

In unserem Projekt verwenden wir einen elektronischen Fühler zur Messung des pH-Werts (**Bild 2**). Die Funktionsweise einer elektronischen pH-Messsonde beruht auf elektronischen und chemischen Prinzipien. Sie besteht aus einer pH-empfindlichen Glaselektrode und einer Referenzelektrode. Erstere enthält ein spezielles Glas, das mit den Wasserstoffionen in der Lösung reagiert.

Wenn die Glaselektrode in die Lösung eingetaucht wird, entsteht eine elektrische Spannung, die dem pH-Wert der Lösung entspricht. Die Referenzelektrode bietet einen stabilen Referenzpunkt für die pH-Messung. In der Regel wird eine Gel- oder Salzlösungs-Referenzelektrode verwendet. Die pH-Sonde kann die Differenz der elektrischen Potentiale zwischen der Glaselektrode und der Referenzelektrode erfassen. Diese Spannung wird mithilfe einer elektronischen Schaltung in einen pH-Wert umgewandelt.

Vor dem Gebrauch muss das Gerät mit bekannten pH-Werten (normalerweise pH 4 und pH 7) kalibriert werden, um die Messgenauigkeit zu gewährleisten. Besondere Vorsicht ist bei der Glaselektrode geboten, die in einer speziellen Lösung gelagert und regelmäßig gereinigt werden sollte, um Ablagerungen zu entfernen, die die Messungen beeinträchtigen könnten. Die Sonde kann nicht direkt an unser Arduino-UNO-R4-Board

angeschlossen werden; das Signal muss über eine Signalverarbeitungsschaltung verstärkt und für den Mikrocontroller lesbar gemacht werden (**Bild 3**).

Die pH-Sonde wird über einen BNC-Stecker mit dem Modul zur Signalverarbeitung verbunden, was eine stabile und zuverlässige Verbindung verspricht. Das Modul verfügt über einen Spannungsausgang, der einen Pegel proportional zum gemessenen pH-Wert ausgibt. Dieser Pin kann an einen Analogeingang eines Controllerboards angeschlossen werden, wie in unserem Fall an den Arduino UNO. Für den ordnungsgemäßen Betrieb muss das Modul mit einer Gleichspannung von 5 V versorgt werden, und angesichts seines geringen Strombedarfs (zwischen 5 mA und 10 mA) können wir es direkt über den 5-V-Pin unseres UNO-R4-Boards versorgen. Für einen ordnungsgemäßen Betrieb ist es notwendig,



Bild 3. Die Platine mit der Signalverarbeitungselektronik ermöglicht den Anschluss der pH-Sonde an den Arduino UNO R4. (Quelle: Elettronica In)



Bild 2. Elektronische Sonde für pH-Messungen. (Quelle: Elettronica In)

vor der Messung mindestens 60 Sekunden zu warten, um genaue Messwerte zu erhalten.

Arduino UNO R4 Minima

Die vierte Version des Arduino UNO, der Arduino UNO R4 Minima, ist für Maker ein großer Schritt vorwärts (**Bild 4**). Diese neue Version verfügt über einen 32-Bit-Arm-Cortex-M4-Prozessor, der mehr Rechenleistung und 16-mal mehr Speicher als die Vorgängerversionen bietet. Trotz dieser Verbesserungen bleiben die Größe und die 5-V-Kompatibilität gleich. Dies gewährleistet einen nahtlosen Übergang für bestehende Shields und Projekte und nutzt das umfangreiche und einzigartige Ökosystem, das bereits für den ursprünglichen Arduino UNO geschaffen wurde (**Bild 5**). Die neue Version bietet außerdem einen schnelleren Takt, wodurch genauere Berechnungen durchgeführt und komplexe



Bild 4. Arduino UNO R4 Minima.

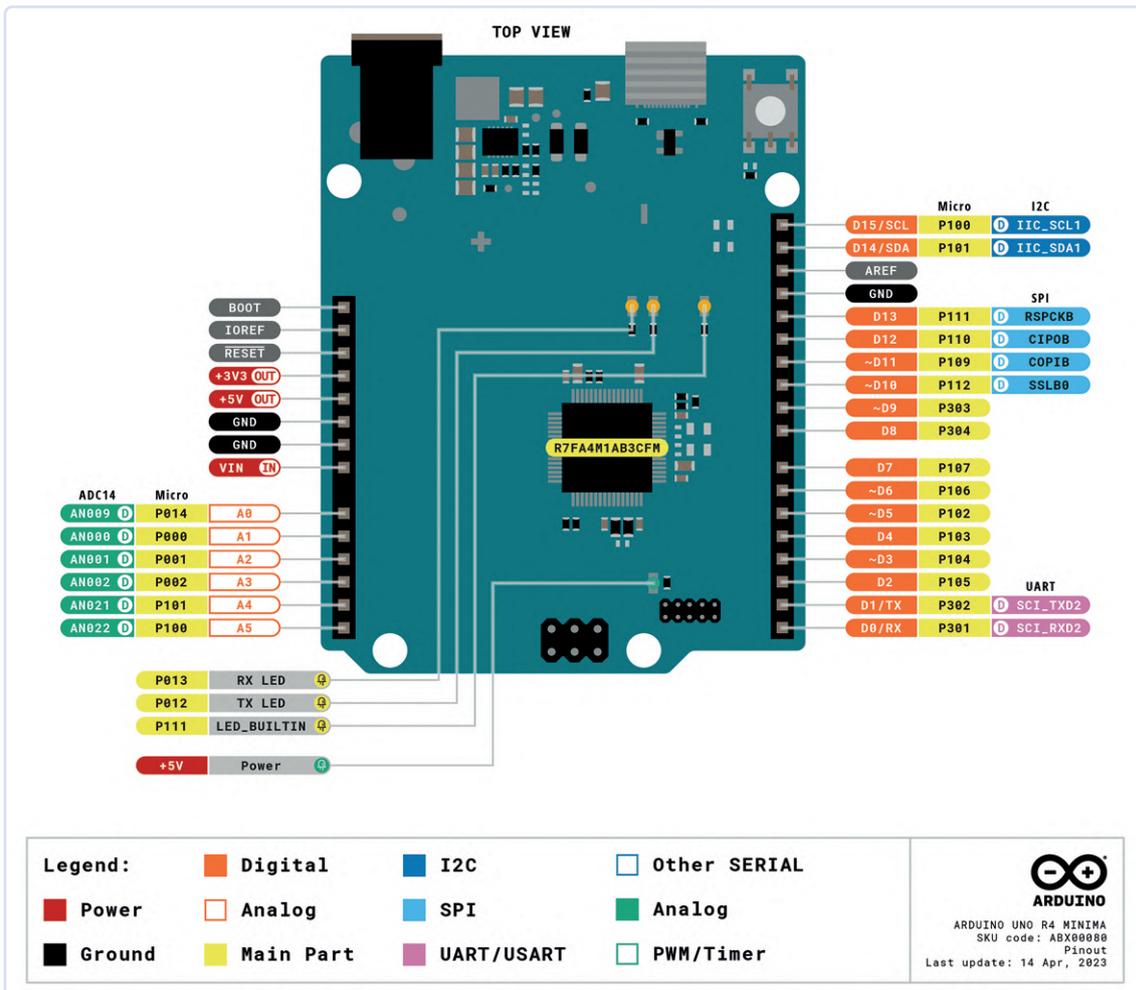


Bild 5. Die Pinbelegung dieses neuen Arduino-Boards ist identisch mit der des vorherigen Modells. (Quelle: arduino.cc)

und anspruchsvolle Programm verarbeitet werden können. Außerdem verfügt es über einen USB-C-Anschluss, der kleiner, leistungsfähiger und haltbarer ist als frühere Anschlüsse. Um den Arduino UNO R4 Minima zu verwenden, muss man das Boardpackage für den UNO-R4-Minima installieren, das Teil des Arduino-Kerns für Renesas-Controller ist. Um es zu installieren, benötigen Sie natürlich die Arduino-IDE, die Sie von der Arduino-Download-Seite [1] herunterladen können. In diesem Artikel verwenden wir die neueste

Downloads

Arduino IDE 2.2.1

The new major release of the Arduino IDE is faster and even more powerful! In addition to a more modern editor and a more responsive interface it features autocompletion, code navigation, and even a live debugger.

For more details, please refer to the [Arduino IDE 2.0 documentation](#).

Nightly builds with the latest bugfixes are available through the section below.

SOURCE CODE

The Arduino IDE 2.0 is open source and its source code is hosted on [GitHub](#).

DOWNLOAD OPTIONS

- Windows** Win 10 and newer, 64 bits
- Windows** MSI installer
- Windows** ZIP file
- Linux** AppImage 64 bits (X86-64)
- Linux** ZIP file 64 bits (X86-64)
- macOS** Intel, 10.14: "Mojave" or newer, 64 bits
- macOS** Apple Silicon, 11: "Big Sur" or newer, 64 bits

[Release Notes](#)

Bild 6. Die neueste verfügbare Version der Arduino-IDE ist 2.2.1.

GESTORE SCHEDE

Arduino Uno R4

Tipo: Tutti

Arduino UNO R4 Boards da Arduino

1.0.1 installato

Boards included in this package: Arduino Uno R4 Minima, Arduino Uno R4 WiFi

Maggiori informazioni

1.0.1 RIMUOVI

Bild 7. Das zu installierende Paket „Arduino UNO R4“.



Listing 1. Definitionen

```
#define SensorPin 0
// the analog output pin of the pH sensor is
// connected to the analog input 0 of the Arduino
# define SensorPin 0

// store the average value of the sensor feedbacks
unsigned long int avgValue;

float b;
int buf[10],temp;

# define SCREEN_WIDTH 128 // OLED screen width in pixels
# define SCREEN_HEIGHT 64 // OLED screen height in pixels
# define OLED_RESET -1 // reset pin (o -1 if the reset handling is shared)

Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RESET);
```

Version der IDE 2 (**Bild 6**). Um das Board-Paket zu installieren, öffnen Sie den *Boardverwalter* im Menü auf der linken Seite, suchen nach *UNO R4 Minima* und installieren Sie die neueste (oder Ihre gewünschte) Version (**Bild 7**). Wenn Sie nun das Board an den Computer anschließen, wird eine virtuelle serielle Schnittstelle eingerichtet, die Sie zur Programmierung des Arduino verwenden können.

Anschlüsse

In diesem Projekt haben wir mehrere Komponenten zum Bau eines pH-Erfassungssystems verwendet, wie Sie im Schaltplan sehen können (**Bild 8**). Das Hauptbauteil ist natürlich die Sonde, die den pH-Wert messen kann, und über einen BNC-Stecker mit zunächst der Signalverarbeitungselektronik und dann mit dem Controllerboard verbunden wird. Wie bereits erwähnt, wird diese Signalverarbeitungsschaltung direkt über die 5-V- und GND-Pins des Arduino UNO R4 mit Strom versorgt. Pin P0 der Signalverarbeitung wurde am Analogeingang (Pin A0) des Arduino-Boards angeschlossen. Diese Verbindung ermöglicht es der Hauptplatine, die vom Sensor erfassten pH-Werte zu lesen. Das verwendete OLED-Display verfügt über eine I²C-Verbindung, die es ermöglicht, mit nur zwei Drähten (abgesehen von der Stromversorgung) das Display zu steuern. Die SDA- und SCL-Pins des Displays sind daher mit den SDA- und SCL-Pins des Arduino-R4-Boards verbunden, während die Stromversorgung von den 3,3-V- und GND-Pins übernommen wurde. Mit diesem Aufbau können wir den pH-Wert mit der Sonde messen und die Ergebnisse auf dem OLED-Display anzeigen.

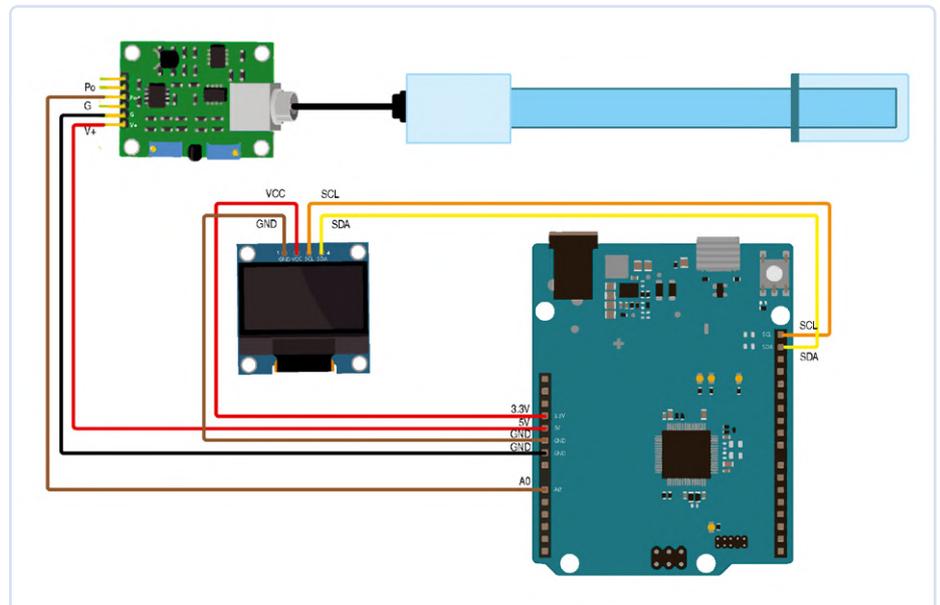


Bild 8. Schaltplan des Projekts.

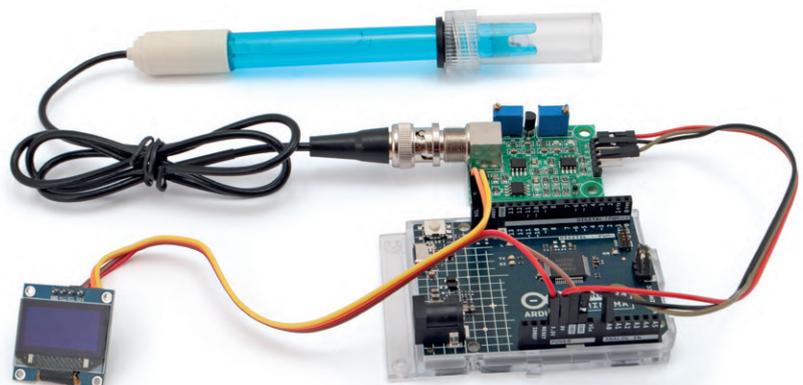


Bild 9. Der fertige Prototyp, bereit zum Testen.

Es ist wichtig, die Anweisungen sowie die im Schaltplan gezeigten Anschlüsse sorgfältig zu befolgen, um den ordnungsgemäßen Betrieb des Systems zu gewährleisten.

Die Firmware

Der für den Arduino UNO R4 geschriebene Code zur Messung des pH-Wertes und zur Anzeige auf einem kleinen OLED-Display kann von der Elektor-Labs-Webseite dieses Projekts [2] heruntergeladen werden. Schauen wir uns den Code im Detail an. Die ersten Zeilen des Codes binden die Bibliotheken ein, die für das Funktionieren des Programms benötigt werden, insbesondere die *Wire*-Bibliothek für I²C und die Bibliotheken *Adafruit_GFX* und *Adafruit_SSD1306* von Adafruit für die Verwaltung des OLED-Displays. Als nächstes werden einige Konstanten und Variablen definiert, die im Programm verwendet werden (**Listing 1**). Die Funktion `setup()` wird beim Start des Programms ausgeführt und spielt eine entscheidende Rolle bei der Initialisierung des Programms (**Listing 2**). Zunächst wird der digitale Pin 13 als Ausgang für die Steuerung einer LED festgelegt. Als nächstes wird die serielle Kommunikation über den Seriellen Monitor mit einer Baudrate von 9.600 initialisiert. Danach prüft das Programm, ob der Speicher für das OLED-Display SSD1306 ordnungsgemäß zugewiesen werden kann. Wenn dies nicht der Fall ist, erscheint eine Fehlermeldung und das Programm bricht ab. Kann das Display hingegen korrekt initialisiert werden, wird eine Reihe von Befehlen zur Konfiguration des Displays ausgeführt. Es wird eine kurze Pause eingelegt, dann wird die Anzeige gelöscht. Die Textgröße wird auf den Wert 2 eingestellt und der Cursor auf die Anzeigekoordinate (10,5) gesetzt. Anschließend wird der Text *PH Sensor* durch Aufruf der Funktion `display.display()` angezeigt. Es wird eine Pause von drei Sekunden eingelegt, damit der Benutzer die Meldung auf dem Display lesen kann, bevor das Programm zur Funktion `loop()` übergeht. Die `loop()`-Funktion ist das Herzstück des Arduino-Sketches und wird nach der Setup-Phase kontinuierlich ausgeführt (**Listing 3**).

Innerhalb von `loop()` werden zehn Abtastwerte vom pH-Sensor über den analogen Pin 0 erfasst. Diese Werte werden dann in aufsteigender Reihenfolge sortiert, um den Mittelwert der mittleren sechs Abtastwerte zu berechnen. Dieses Vorgehen eliminiert den Einfluss eventueller Ausreißer. Dieser Wert wird dann in Millivolt und anschließend in

den entsprechenden pH-Wert umgerechnet. Letzten Endes wird der pH-Wert auf dem Seriellen Monitor mit einer Genauigkeit von zwei Dezimalstellen geschrieben und auch auf dem OLED-Display angezeigt.

Dann wird die an den digitalen Pin 13 angeschlossene LED ein- und ausgeschaltet, um eine visuelle Rückmeldung der Messung zu geben, und schließlich macht das Programm eine Pause von 800 ms, bevor es die Schleife erneut startet und die gleichen Vorgänge zur Erfassung und Berechnung der pH-Werte durchführt. Diese Schleife wird unendlich oft wiederholt, solange der Arduino mit Strom versorgt wird. **Bild 9** zeigt den fertigen, funktionsfähigen Prototyp.

Prüfen wir das Wasser!

In diesem Artikel wurde ein pH-Messsystem vorgestellt, das einen speziellen Sensor, das Arduino-UNO-R4-Minima-Board und ein OLED-Display verwendet. Das System bietet eine vielseitige Lösung für die genaue Messung des pH-Werts einer Lösung in verschiedenen Kontexten, zum Beispiel in der Hydrokultur, in Schwimmbädern und Aquarien. Es ist ein hervorragender Ausgangspunkt für die Anpassung an Ihre spezifische Anwendung. ◀

SG – 230711-02

Über den Autor

Boris Landoni ist Experte für Elektronik und ein echter Enthusiast auf diesem Gebiet. Seine Leidenschaft hat ihn zum Geschäftsführer von Eletttronica In gemacht, der populärsten Elektronikzeitschrift in Italien. Außerdem ist er Kurator von open-electronics.org, einer Plattform für Open-Source-Projekte, die Enthusiasten und Fachleute zusammenbringt.

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

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



Passende Produkte

> **Arduino UNO R4 Minima**
www.elektor.de/20527

> **Experimentier-Paket Arduino UNO R4**
www.elektor.de/20648



Listing 2. setup()

```
void setup() {
  pinMode(13, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Ready");

  if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
    Serial.println(F("SSD1306 allocation failed"));
    for (;;)
  }

  display.display();
  delay(2);
  display.clearDisplay();
  display.clearDisplay();
  display.setTextColor(WHITE);
  display.setTextSize(2);
  display.setCursor(10, 5);
  display.print("pH Sensor");
  display.display();
  delay(3000);
}
```



Listing 3. loop()

```
void loop() {
  // Get 10 sample values from the sensor to
  // get a more accurate measurement
  for (int i = 0; i < 10; i++) {
    buf[i] = analogRead(SensorPin);
    delay(10);
  }

  // Sort the analog values from smallest to largest
  for (int i = 0; i < 9; i++) {
    for (int j = i + 1; j < 10; j++) {

      if (buf[i] > buf[j]) {
        temp = buf[i];
        buf[i] = buf[j];
        buf[j] = temp;
      }
    }
  }

  avgValue = 0;

  // take the average value of 6 center sample
  for (int i = 2; i < 8; i++)
    avgValue += buf[i];

  // convert the analog into millivolts
  float phValue = (float)avgValue * 5.0 / 1024 / 6;

  // convert millivolts into pH value
  phValue = 3.5 * phValue;

  Serial.print("  pH:");
  Serial.print(phValue, 2);
  Serial.println(" ");

  display.clearDisplay();
  display.setTextSize(2);
  display.setCursor(20, 5);
  display.println("Ph Value");
  display.setTextSize(3);
  display.setCursor(30, 35);
  display.print(phValue);
  display.display();

  digitalWrite(13, HIGH);
  delay(800);
  digitalWrite(13, LOW);
}
```

WEBLINKS

- [1] Download-Seite Arduino-IDE 2: <https://arduino.cc/en/software>
- [2] Elektor Labs-Webseite für dieses Projekt:
<https://elektormagazine.de/labs/measuring-ph-value-with-arduino>

12-bit for Every Bench

SDS3000X HD

High Resolution Oszilloskop

350 MHz ~ 1 GHz



SDS1000X HD

High Resolution Oszilloskop

100 MHz ~ 200 MHz



SDS800X HD

High Resolution Oszilloskop

70 MHz ~ 200 MHz



 **SIGLENT**[®]

www.siglenteu.com

Info-eu@siglent.com

Aus dem Leben gegriffen

Startrampe für Pangpong-Popöchen

Von Ilse Joostens (Belgien)

Wer mich kennt, weiß, dass ich mich in feine Wortspiele verstricken kann, die manchmal zu komischen Situationen führen, wie das eine Mal, als ich in der örtlichen Pizzeria versehentlich eine „Pizza Salmonella“ statt einer „Pizza Salmone“ bestellen wollte. Auf den Gesichtsausdruck der Metzgersfrau, als mein Partner aus Versehen „filet de sax“ (Lachsschinken) in etwas weniger Veröffentlichungsfähiges verwandelte, gehe ich nicht näher ein. Eric Bogers aus der Elektor-Redaktion hat ebenfalls eine Vorliebe für Wortspiele, und der merkwürdige Titel dieses Artikels stammt aus seiner Kindheit, als sein Vater Tischtennisbälle immer als „Pangpong-Billetjes“ bezeichnete.

Dieses unübersetzbare Wortspiel* hat sich dann zum inoffiziellen Codenamen für dieses Projekt – ein Ziel mit schwebenden Bällen für Druckluftwaffen – gemausert, das vor einiger Zeit in der Rubrik *Das besondere Projekt* [1] vorgestellt wurde.

Die CADze im Sack

Nach den Reaktionen der Leser zu urteilen, scheint es ein recht großes Interesse an diesem Projekt zu geben, vor allem von Schützenvereinen, die ihren jungen Mitgliedern mal etwas anderes bieten wollen. Um ehrlich zu sein, wird das wiederholte Zielen auf Pappkarten in einem eigenen Tempo mit der Zeit ein wenig eintönig. Plinking [2], ein Euphemismus für das Schießen auf alle möglichen Gegen-

stände einschließlich Tischtennisbällen ist eine willkommene Abwechslung (**Bild 1**).

Nach einer längeren Zeit der Inaktivität habe ich den Faden wieder aufgenommen, also ist es Zeit für ein Update. Wenn Sie den Drang verspüren, gleich loszulegen, habe ich gute Nachrichten für Sie, denn Sie können jetzt die CAD-Zeichnungen mit Fotos (siehe **Bild 2** als Beispiel) der gesamten mechanischen Konstruktion von [3] herunterladen. Ich habe auch mit dem Entwurf der Elektronik begonnen. Falls Ihnen der Gedanke an winzige SMDs Angst macht, kann ich Sie beruhigen: Um die Dinge so makerfreundlich wie möglich zu halten, ist bis auf ein Funkmodul alles mit klassischen bedrahteten Bauteilen aufgebaut (**Bild 3**). Selbst das Modul mit einem Raster von 2 mm ist nicht allzu schwierig zu löten. Man mag es nicht vermuten, aber der Schießsport ist eine der sichersten Sportarten und, gemessen an den Versicherungsbeiträgen, ungefähr so gefährlich wie Bridge. Na ja, fast, denn ich kenne einen Schützen, der gerne mit extrem schweren Kalibern schießt, wodurch

sich die Zahnfüllungen lösen. Da Sicherheit auch bei Druckluftwaffen wichtig ist und elektrische Leitungen in einem Schießstand in der Regel keine gute Idee sind, habe ich mich bei der Elektronik für eine drahtlose Fernsteuerung und Komponenten von seriösen Firmen entschieden. Wenn Sie dachten, dass dies eine kostengünstige Lösung sein könnte, muss ich Sie leider enttäuschen: Dieses Projekt ist etwas kostspieliger, was die Materialkosten angeht, aber das ist besser, als jedes Mal durch einen Schießstand laufen zu müssen, um ein defektes System nach einer weiteren Fehlfunktion wieder zum Laufen zu bringen. Es gab auch Fragen nach der Möglichkeit, die mechanischen Komponenten des Systems nach dem eigenen Geschmack und den eigenen Vorlieben anzupassen. Das System basiert auf dem Anakonda... Koala... äh... Coandă-Effekt [4], auch wenn einige behaupten werden, dass tatsächlich Herr Bernoulli dahinter steckt. Trotzdem habe ich bei der Entwicklung keine komplexen mathematischen Formeln verwendet und bin dem Prinzip

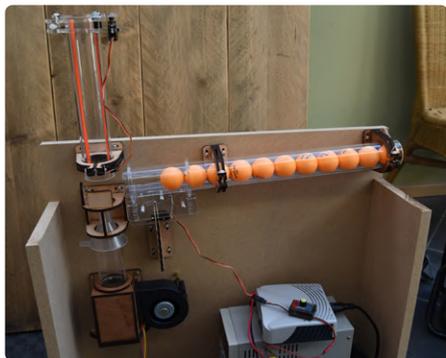


Bild 1. Der Prototyp von 2023.

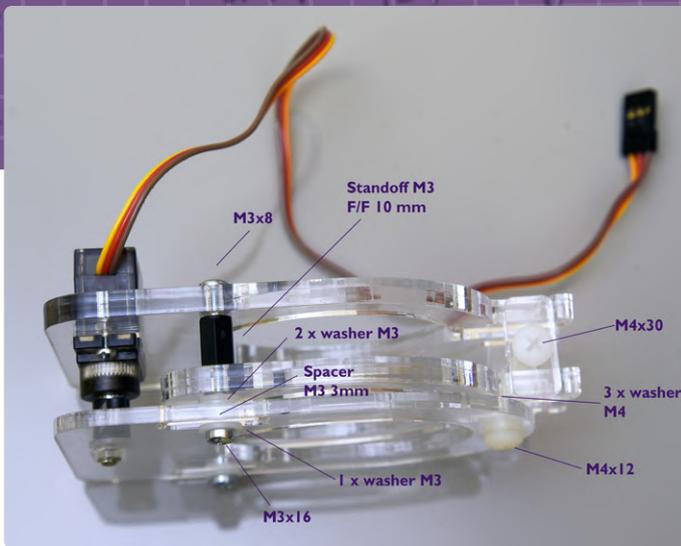


Bild 2. Aufbau des Schiebemechanismus (Beispiel).

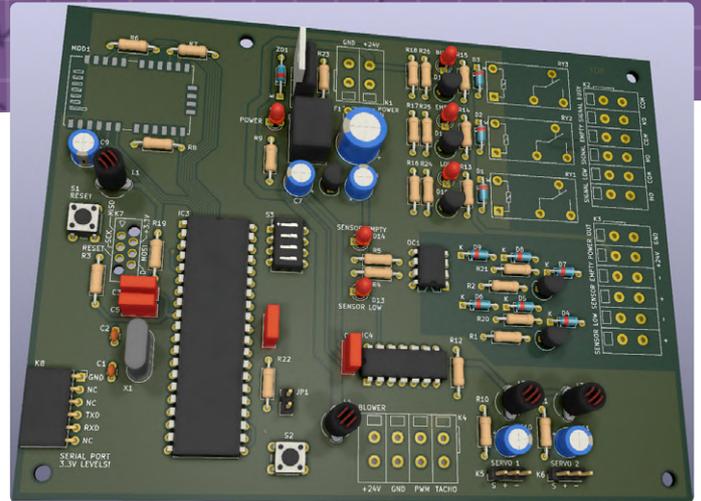


Bild 3. Rendering der Platine für bedrahtete Bauteile.

von Versuch und Irrtum gefolgt. Trauen Sie sich also vor allem, selbst zu experimentieren.

Coffein in My Brain

Der Prozess des Entwerfens ist ziemlich anspruchsvoll und erfordert eine große mentale Anstrengung. Ich muss gestehen, dass ich ein Koffeinjunkie der nächtlichen Art und eine Liebhaberin von Kaffee in Kapseln bin, weil er so einfach zu handhaben ist. Nun haben Tischtennisbälle und Kaffee kapseln eines gemeinsam: Sie sind beide rund, weshalb ich schon seit einiger Zeit darüber nachdachte, das Funktionsprinzip des Tischtennisball-Magazins auf Kaffee kapseln zu übertragen. Herausgekommen ist ein Kaffee kapselspender mit sechs Magazinen zu je zehn Kapseln (**Bild 4**). Wenn Sie sich daran versuchen möchten, sind auch hier CAD-Dateien und Fotos der mechanischen Konstruktion verfügbar [5]. Der praktische Nutzen dieses Geräts mag zweifelhaft sein, aber es ist ein nettes Gimmick für einen Maker- oder Hacker-Space oder, falls gewünscht, für die Kantine Ihres Liebblingsschießstandes - warum nicht?

Leider kein Bausatz

Wenn Sie diese Projekte nachbauen möchten, sollten Sie Zugang zu einem Laserschneider haben. Vielleicht kann Ihnen Ihr lokaler Maker-

space oder Fablab dabei helfen. Ich hätte Ihnen gerne einen Bausatz angeboten, aber das ist aufgrund der europäischen Vorschriften leider nicht mehr möglich. Sind Sie auch genervt von den endlosen Reihen irritierender Cookie-Pop-ups, an Getränkeverpackungen befestigen Verschlüssen und Haltungen, einem Dschungel von Labels auf Konsumgütern und einem Meer von Vorschriften? Pech gehabt - trotz unserer kollektiven Ablehnung für Bürokratie wird uns immer mehr davon aufgedrängt. Dazu gehören auch die aktuellen Vorschriften für die Wiederverwertung von Verpackungsmaterial [6], die immer strenger durchgesetzt werden und uns als kleines Unternehmen dazu zwingen würden, uns in mehreren europäischen Ländern registrieren zu lassen, einschließlich der Abgabe von Steuererklärungen, ganz zu schweigen von den Kosten. Immer mehr kleine Unternehmen werfen daher das Handtuch, weil der bürokratische Aufwand unerträglich und unbezahlbar wird. Aber was ist mit dem, was wirklich wichtig ist, etwa eine stärkere Industrie, strategische Unabhängigkeit angesichts der bevorstehenden amerikanischen Präsidentschaftswahlen oder Investitionen in die eigene Chipindustrie wie in Südkorea, das mit 430 Milliarden Euro das größte „Silicon Valley“ der Welt aufbauen will? ◀

SG — 240030-02

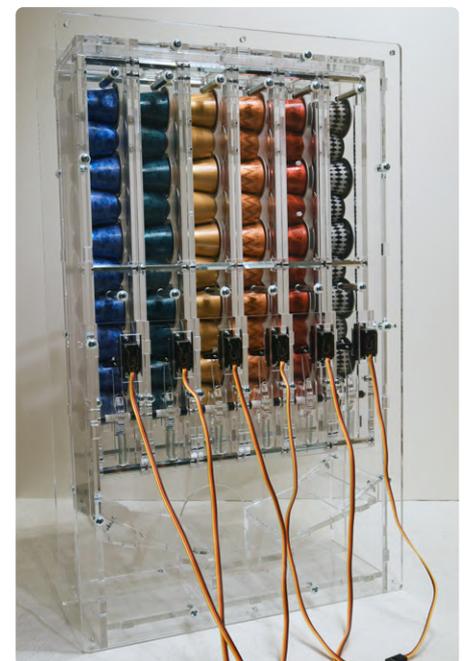


Bild 4. Koffein auf Abruf: Kaffee kapselspender.

* Tischtennisbälle heißen im Niederländischen etwas despektierlich „Pingpong-Balletjes“. Wenn man die Silben ordentlich rüttelt und schüttelt, werden daraus besagte „Pangpong-Billetjes“, wobei „Billetje“ ein Kosenamen für ein reizendes Hinterteil ist - halt ein Popöchen.

WEBLINKS

- [1] Ilse Joostens, „Das besondere Projekt – Es gibt noch viel zu tun!“, Elektor 5-6/2023: <https://www.elektormagazine.de/magazine/elektor-301/61734>
- [2] Wikipedia: Plinking: <https://de.wikipedia.org/wiki/Plinking>
- [3] Downloads Tischtennisball-Startampe: <https://t1p.de/nwef9>
- [4] Wikipedia: Coandă-Effekt: <https://de.wikipedia.org/wiki/Coand%C4%83-Effekt>
- [5] Downloads Kaffee kapsel-Spender: <https://t1p.de/50xqo>
- [6] Verpackungslizenz in der EU: Das sind die Pflichten in den Mitgliedsstaaten: <https://verpackungslizenz24.de/en/eu-packaging-licence>

Digitales Speicher- oszilloskop FNIRSI 1014D

Gute Leistung für knappe Budgets

Von Günter Spanner (Deutschland)

Für Tätigkeiten wie das Basteln mit Verstärkern, Sensoren und Mikrocontrollern wie Arduinos, ESPs, Raspberry Pis oder die Reparatur von Unterhaltungselektronik ist ein Oszilloskop mit einer Bandbreite von 100 MHz und zwei Kanälen völlig ausreichend. Auch ein Frequenz- oder Funktionsgenerator zur Erzeugung von Testsignalen oder zur Überprüfung von Filtern ist in vielen Anwendungen praktisch. Mit dem FNIRSI 1014D erhalten Sie beide Funktionen in einem Gerät.

Neben einer Lötstation, einem Multimeter und einer Stromversorgung ist ein Oszilloskop das nächste unverzichtbare Werkzeug in einer Elektronikwerkstatt [1]. Für eine Hobbywerkstatt braucht man jedoch kein Gerät mit 500 MHz Bandbreite, zahlreichen Kanälen oder ausgefeilten Analysefunktionen. Beim Basteln mit Verstärkern, Sensoren und Mikrocontroller-Boards wie Arduinos, ESPs und Raspberry Pis oder bei der Reparatur von Unterhaltungselektronik ist ein Oszilloskop mit einer Bandbreite von 100 MHz und zwei Kanälen vollkommen ausreichend. Für viele Anwendungen ist auch ein Frequenz- oder Funktionsgenerator zur Erzeugung von Testsignalen oder zur Überprüfung von Filtern nützlich. Mit dem FNIRSI 1014D [2] erhalten Sie beide Funktionen in einem Gerät. Das Oszilloskop wird mit zwei umschaltbaren Tastköpfen (1× und 10×), einem USB-Netzteil, einem Handbuch und einem Werkzeug zur Tastkopfeinstellung geliefert. Die Stromversorgung des Oszilloskops erfolgt über das USB-Netzteil, das 2 A bei 5 V liefert.



Mit Abmessungen von 310×145×70 mm ist es kompakt und tragbar, aber groß genug, um bequem bedient zu werden. Mit den ausklappbaren Füßen lässt es sich in einem guten Winkel auf dem Labortisch platzieren.

Technische Daten

Die wichtigsten technischen Daten des FNIRSI 1014D sind:

- 2 Kanäle mit einer Bandbreite von je 100 MHz
- 7-Zoll-LCD mit einer Auflösung von 800×480 Pixeln
- 1 GSample/s Abtastrate
- 240 Kbit Speichertiefe
- 1 MΩ (1×) oder 10 MΩ (10×) Eingangsimpedanz
- 50 mV bis 400 V Empfindlichkeit
- 50 s bis 10 ns Zeitbasis
- Trigger-Modus: Einfach/Normal/Auto bei steigender oder fallender Flanke
- AC/DC-Kopplung
- Ein-Knopf-Auto-Einstellung
- Frequenzgenerator mit 14 Wellenformen bis zu 10 MHz (Sinus)
- USB-Ausgang

Wie bei digitalen Oszilloskopen üblich, werden neben der Signal-darstellung auch Werte wie Spannung (Spitze, RMS, Minimum, Maximum und so weiter), Frequenz und Tastverhältnis numerisch angezeigt (Bild 1). Der Benutzer kann über ein Menü auswählen, welche Werte angezeigt werden sollen. Zwei Cursors ermöglichen die präzise Messung von Zeitintervallen und Spannungen.

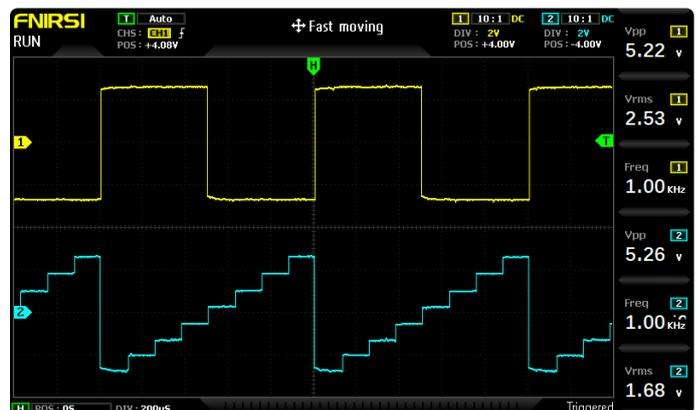


Bild 1. Wellenformen und Messergebnisse.

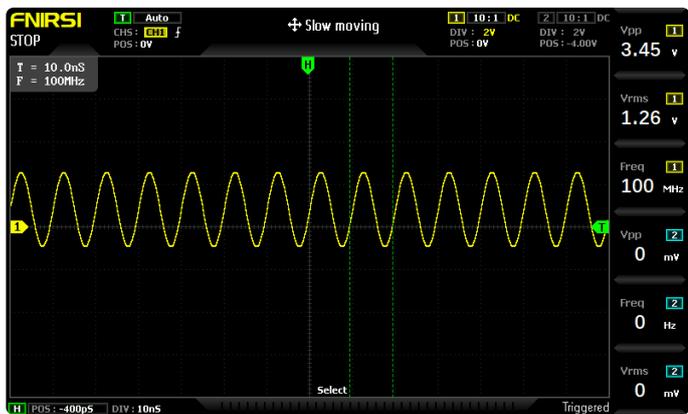


Bild 2. Ein 100-MHz-Signal mit einer Amplitude von 3,45 V auf dem Display des FNIRSI 1014D.

Eine Auto-Set-Funktion konfiguriert das Oszilloskop automatisch auf sinnvolle Parameter, die auf dem Eingangssignal basieren. Sogar eine einfache FFT-Darstellung des Signals kann angezeigt werden. Das FNIRSI 1014D kann eine maximale Eingangsspannung von 400 V verarbeiten. Die Triggerung kann auf die steigende oder die fallende Flanke eingestellt werden. Das Oszilloskop verfügt auch über eine automatische Triggerfunktion, die zuverlässig arbeitet.

Stromversorgung: USB-Netzteil oder Powerbank

Neben dem Standard-USB-Netzteil kann das Oszilloskop auch mit einer Powerbank betrieben werden. In diesem Fall ist das Oszilloskop vollständig galvanisch getrennt, so dass Messungen in Schaltkreisen und ähnlichen Schaltungen ohne Trenntransformator möglich sind. Allein dadurch lohnt sich für derlei Anwendung der Kauf eines das FNIRSI 1014D, da die hohen Kosten für Differenz-Tastköpfe entfallen, die selbst in einer Billigversion so viel wie das Oszilloskop kosten würden. Außerdem wird das Oszilloskop durch die Verwendung einer Powerbank als Energiequelle sehr tragbar und kann an jedem beliebigen Ort eingesetzt werden, zum Beispiel in Stromkästen oder in Fahrzeugen. Mit einer handelsüblichen 12-Ah-Powerbank ($I_{\max} > 2 \text{ A}$) läuft das FNIRSI 1014D etwa fünf Stunden im Dauerbetrieb. Dies ist für die meisten Anwendungen ausreichend.

Achtung! Im Handbuch des FNIRSI 1014D heißt es, dass „das Original-Netzteil verwendet werden muss“. Die Verwendung einer Powerbank erfolgt also auf eigene Gefahr, auch wenn bei den Tests keine Probleme auftraten.

Überprüfung der Leistungsangaben

Im Hinblick auf die angegebene Bandbreite von 100 MHz sollten einige Dinge nicht übersehen werden. Um ein Signal mit einer maximalen Frequenzkomponente von 50 MHz zu messen, wird ein Oszilloskop mit einer Bandbreite von 100 MHz benötigt. Wenn eine Messung wirklich aussagekräftig und gut aufgelöst sein soll, gilt die 1:5-Regel: Ein Oszilloskop mit einer Bandbreite von 100 MHz kann ein Signal mit einer maximalen Frequenzkomponente von 20 MHz effektiv und genau darstellen.

Für Messungen an Arduinos, Audioverstärkern, Raspberry Pis und ähnlicher Elektronik ist eine Bandbreite von 100 MHz völlig in Ordnung. Allerdings ist die angegebene Bandbreite des FNIRSI 1014D mit 100 MHz etwas hoch gegriffen. Das Gerät erfüllt kaum das klassische -3-dB-Bandbreitenkriterium, obwohl es ein

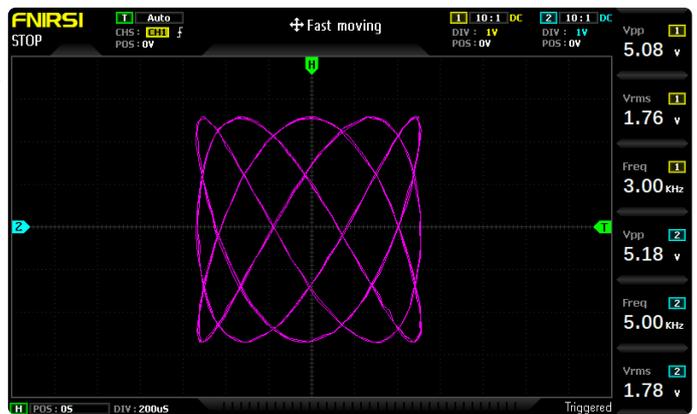


Bild 3. X/Y-Betrieb und Lissajous-Figur.

100-MHz-Signal in akzeptabler Weise darstellt (**Bild 2**). Weitere Einzelheiten dazu finden Sie weiter unten.

Die Mindestempfindlichkeit von 50 mV/div ist nicht spektakulär. Die meisten DSOs bieten in der Regel eine Empfindlichkeit von mindestens 10 mV/div. Dennoch liegen die Messwerte innerhalb der angegebenen Toleranzen, und die Analysemöglichkeiten sind zufriedenstellend.

Speichern und Analysieren von Signalen

Alle Messungen können als Bildschirmfoto und/oder Wellenform gespeichert und über eine Galerieansicht aufgerufen werden. Wenn eine Kurvenform gespeichert wird, lässt sie sich auch nach der Messung genau so analysieren, als ob die Messsignale noch vorhanden wären (**Bild 3**). Für Kurvenformen und Screenshots steht 1 GB interner Speicher zur Verfügung, der über einen Computer ausgelesen werden kann. Beim USB-Betrieb wird das FNIRSI 1014D einfach als Wechseldatenträger erkannt, und es sind keine Treiber oder zusätzliche Software erforderlich.

Erweiterte mathematische Funktionen, Busdekodierung und ähnliche Spezialitäten hat das FNIRSI 1014D nicht zu bieten, was angesichts des Preises verständlich und akzeptabel ist. Dennoch können einfache Fourier-Transformationen dargestellt werden. Da sie keine detaillierten Messanwendungen ermöglichen, ist ihr Wert aber auf die einfache Analyse von Oberschwingungen beschränkt (**Bild 4**).

Für Fachleute: Bandbreite und Abtastrate

Wie bereits erwähnt, sind die Spezifikationen bezüglich Bandbreite (100 MHz) und Abtastrate (1 GSamples/s) etwas geschönt.

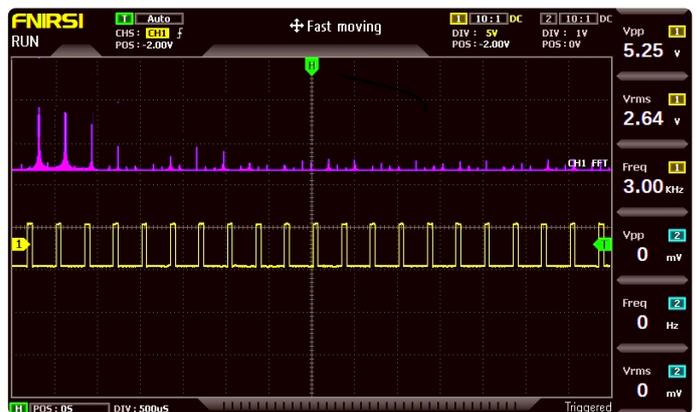


Bild 4. Die FFT-Anzeige ist recht einfach gehalten.

Im Zusammenhang mit Oszilloskopen sind die Begriffe Abtastrate, Bandbreite und Oversampling von entscheidender Bedeutung, da sie die Leistung und Genauigkeit dieser Geräte bestimmen.

Hier einige Grundlagen: Die Abtastrate bezieht sich auf die Anzahl der Datenpunkte, die ein Oszilloskop pro Sekunde aufzeichnet, und wird in Samples/s gemessen (1 GSamples/s entspricht 1.000.000.000 Samples pro Sekunde). Die Abtastrate muss ausreichend hoch sein, um eine Wellenform angemessen darzustellen. Nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem sollte die Abtastrate mindestens das Doppelte der höchsten Frequenzkomponente des zu analysierenden Signals betragen, um eine korrekte Wiedergabe zu gewährleisten. Für ein Signal mit einer Maximalfrequenz von 100 MHz ist also eine Abtastrate von mindestens 200 MSamples/s (Megasamples pro Sekunde) erforderlich.

Bei der Überabtastung arbeitet das Oszilloskop mit einer Abtastrate, die deutlich höher ist als die für die Darstellung des Signals erforderliche Mindestabtastrate. Dadurch können Oszilloskope Signale mit höherer Genauigkeit erfassen, insbesondere wenn es darum geht, schnelle Signaländerungen darzustellen.

Ein Oszilloskop kann das Signal mit einer hohen Abtastrate erfassen und dann digitale Signalverarbeitungstechniken einsetzen, um eine genauere Darstellung des Signals zu erzeugen. Dies ermöglicht eine bessere Analyse von Details und schnellen Signalereignissen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Abtastrate angibt, wie viele Datenpunkte pro Sekunde ein Oszilloskop aufzeichnet, während Oversampling eine Technik ist, bei der das Oszilloskop mit einer höheren Abtastrate arbeitet, um genauere Signalinformationen zu erfassen und anzuzeigen.

Eine Abtastrate von 1 GigaSample/s (= 1000 Megasample/s) ist also gut geeignet für eine Bandbreite von 100 MHz (fünffaches Oversampling). Leider hat das FNIRSI 1014D nur eine Echtzeit-Abtastrate von 200 MSamples/s, nicht 1 GSample/s. Es verfügt über zwei zweikanalige Analog-Digital-Wandler mit 100 MHz im Interleaved-Modus. Das Oszilloskop verwendet einen ADC mittlerer Leistung und arbeitet mit sukzessivem Shifted Sampling, was ein stabiles Signal erfordert, um die tatsächliche Wellenform darzustellen.

Ein Echtzeit-Oszilloskop digitalisiert, wie der Name schon sagt, das Eingangssignal in Echtzeit, indem es schnell genug abtastet, um ein eingehendes Signal genau zu erfassen und anzuzeigen. Jeder Datenpunkt auf dem Display wurde direkt nach dem vorhergehenden abgetastet. Diese Geräte werden manchmal auch als Single-Shot-Oszilloskope bezeichnet, da sie in der Lage sind, ein Signal mit einer einzigen Erfassung zu erfassen. Ein Abtastoszilloskop hingegen verwendet einen „Sweep“ über ein Zeitfenster. Dies geschieht durch Hinzufügen einer kleinen, festen Verzögerung bei jeder Iteration. Dies funktioniert aber nur bei sich wiederholenden Signalen. Mit dieser Technik erreicht das FNIRSI 1014D eine „effektive“ Abtastrate von 1 GSamples/s.

Ein weiteres Problem ist die Mittelwertbildung. Normalerweise kann die Mittelwerttiefe eingestellt werden. Das FNIRSI 1014D verwendet offensichtlich eine feste Mittelwertbildung, was darauf hindeutet, dass es etwas zu verbergen gibt. In diesem Fall wendet das FNIRSI 1014D nämlich wohl einige mathematische Tricks an, um die begrenzte Bandbreite und Abtastrate oder die geringe Empfindlichkeit auszugleichen.

Schließlich bezieht sich die Bandbreite auf die Frequenz, bei der die Amplitude des Eingangssignals des Oszilloskops um 3 Dezibel (dB) im Vergleich zu seinem niederfrequenten Wert abgeschwächt wird. Mit anderen Worten, es handelt sich um die Frequenz, bei der die Spannung eines sinusförmigen Eingangssignals auf etwa 71 % seines ursprünglichen Wertes reduziert wird. Für Oszilloskope ist die -3-dB-Bandbreite ein wichtiger Parameter, da sie den Frequenzbereich angibt, den das Oszilloskop genau erfassen und anzeigen kann. In der Praxis wird ein Signal mit einer Frequenz, die der -3-dB-Bandbreite entspricht, immer noch auf dem Oszilloskop angezeigt, aber seine Amplitude ist im Vergleich zu niedrigeren Frequenzen um etwa 30 % reduziert. Jenseits des -3-dB-Punktes nimmt die Fähigkeit des Oszilloskops ab, höherfrequente Komponenten eines Signals getreu darzustellen (**Bild 5**). Dies erfordert aber in der Regel, dass das Durchlassband glatt ist. Dies ist genau das Hauptproblem des FNIRSI 1014D: Der Frequenzgang ist nicht glatt und erreicht zudem kaum die 100-MHz-Marke.

Die gestrichelte grüne Linie in Bild 5 zeigt den üblichen Frequenzabfall eines Oszilloskops. Die blaue Linie wurde an dem FNIRSI 1014D gemessen. Selbst wenn also das -3-dB-Kriterium für ein 100-MHz-Signal erfüllt ist, kann der wackelige Durchlassbereich zu falschen Messergebnissen bei höheren Frequenzen führen.

Der Funktionsgenerator

Eines der faszinierendsten Merkmale des FNIRSI 1014D ist sein integrierter Funktionsgenerator. Obwohl er nicht ganz so wichtig ist wie ein Oszilloskop, ist ein Generator ein Standardwerkzeug in den meisten Elektroniklabors. Ob zum Testen von Verstärkern, Resonatoren oder als Referenztaktgeber für digitale Schaltungen, ein Funktionsgenerator ist unverzichtbar.

Der Generator des FNIRSI 1014D bietet die folgenden Funktionen:

- ▶ Feste Amplitude (Spitze-zu-Spitze) von 2,5 V
- ▶ Frequenzbereich: 1 Hz bis 10 MHz (Sinus); 1 Hz bis 2 MHz (alle anderen)
- ▶ 14 Funktionstypen: Sinus, Rechteck, Dreieck, Sägezahn, Schritt, Halbwelle, Vollwelle, exponentiell, logarithmisch, exp-log, Quadratwurzel, Multi-Audio, Sync-Impuls, anwenderspezifisch
- ▶ Tastverhältnis: 1 % bis 99 % (Rechteckwelle)

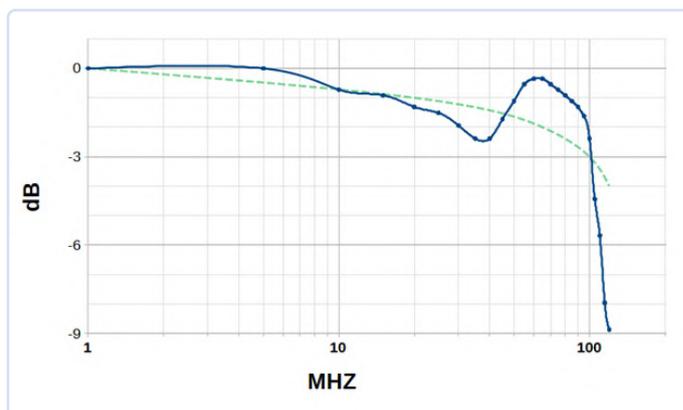


Bild 5. Die gemessene Bandbreite des FNIRSI 1014D.

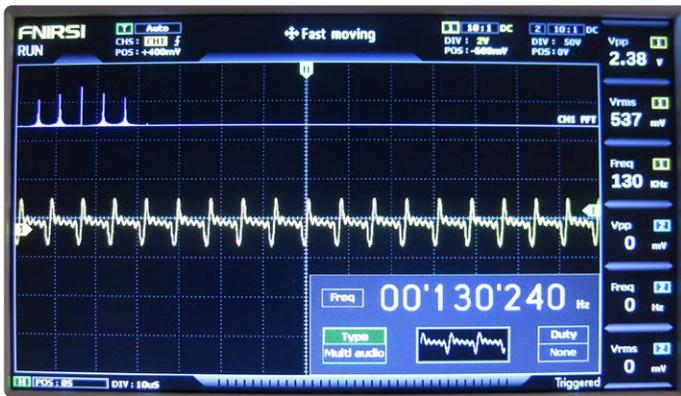


Bild 6. Integrierter Funktionsgenerator.

Leider ist die Amplitude des Generators auf $2,5 V_{ss}$ festgelegt, was seine Vielseitigkeit ein wenig einschränkt. Dennoch sind die meisten Standardanwendungen wie die Überprüfung der Resonanzkurven von Audioverstärkern weiterhin möglich. Dank des variablen Tastverhältnisses sind auch Pulse und asymmetrische Rechteckwellen möglich.

Der integrierte Frequenzgenerator (Bild 6) kann also ein zusätzliches Gerät auf der Werkbank ersetzen, sofern keine außergewöhnlichen Funktionen verlangt werden.

Vor- und Nachteile

Alles in allem führen die Testergebnisse zu folgendem Eindruck:

Vorteile

- > Einfach zu bedienen
- > Geringe Abmessungen mit verhältnismäßig großem Display
- > Scharfes und helles Display mit allen Informationen (V_{pp} , V_{avg} , Frequenz, et cetera) gut sichtbar
- > Funktionsgenerator mit BNC-Anschluss auf der Vorderseite ist enthalten
- > Grundlegende FFT-Funktion ist verfügbar
- > Stromversorgung über USB (5 V, 2 A), Batteriebetrieb problemlos möglich

Nachteile

- > Keine mathematischen Funktionen (addieren, subtrahieren)
- > Feste Mittelwertbildung
- > „Ungewöhnlicher“ Verlauf des Durchlassbands
- > 1 GSample/s nur im Sampling-Modus

Erschwinglich und tragbar

Das FNIRSI 1014D wird wahrscheinlich nicht in vielen High-End-Forschungs- und Entwicklungslabors zum Einsatz kommen. Für diejenigen aber, die ein erschwingliches Einsteigergerät suchen, erfüllt es seinen Zweck gut. Seine Stärken liegen nicht in hochfrequenten Messungen oder extremer Präzision der Signalgrößen, aber für die meisten Aufgaben, bei denen ein Arduino [3], ESP32 [4] oder Raspberry Pi [5] zum Einsatz kommt, kann das Gerät zweifellos nützliche Dienste leisten.

Alles in allem ist das FNIRSI 1014D ein erschwingliches, tragbares Digitaloszilloskop mit zwei Kanälen und ausreichender Ausstattung und Leistung. Es eignet sich gut für Hobbywerkstätten, Schulen, Elektronik-Enthusiasten oder allgemeine Reparaturaufgaben. ◀

RG – 240074-02

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Bei technischen Fragen können Sie die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de kontaktieren.



Passendes Produkt

- > **FNIRSI 1014D (2-in-1) 2-Kanal Oszilloskop (100 MHz) & Signalgenerator**
www.elektor.de/20639



WEBLINKS

- [1] Jean-François Simon, „Auswahl und Verwendung eines Oszilloskops: ein Leitfaden für Einsteiger“, elektormagazine.de, November 2023; <https://www.elektormagazine.de/articles/oszilloskop-einsteiger-leitfaden>
- [2] FNIRSI 1014D im Elektor Store: <https://elektor.de/fnirsi-1014d-2-in-1-2-ch-oscilloscope-100-mhz-signal-generator>
- [3] Arduino-Artikel auf unserer Website: <https://elektormagazine.de/tags/arduino>
- [4] ESP32-Artikel auf unserer Website: <https://elektormagazine.de/tags/espressif/esp32>
- [5] Raspberry Pi Select Seite auf unserer Website: <https://elektormagazine.de/raspberry-pi>

2024 Eine Odyssee in die KI

Wie man die Objekterkennung zum Laufen bringt

Von Brian Tristam Williams (Elektor)

Wir erforschen die Objekterkennung auf unserem „headless“ Raspberry Pi und beschreiben die Einrichtung der Kamera und die Anpassung von TensorFlow Lite für Echtzeitanwendungen.

In der letzten Folge [1] habe ich Tensorflow Lite auf dem Raspberry Pi installiert, auf dem das Raspberry Pi OS ohne grafische Benutzeroberfläche (GUI) läuft, auch bekannt als Headless-Installation. Dieses Mal will ich detailliert beschreiben, wie ich die Kamera zum Laufen gebracht und versucht habe, damit Dinge zu erkennen.

Die Kamera nimmt die Arbeit auf

Als Erstes wollte ich einige Packages installieren, um die Kamera zu testen. Bei einer Headless-Version des Raspberry Pi OS kann man aber nicht einfach auf eine Kameraanwendung klicken, sondern muss vom PC aus per SSH Kontakt mit dem Raspberry Pi aufnehmen. Dieses Mal

verwende ich die PuTTY-App [2] unter Windows, um mich per SSH in den Raspberry Pi einzuwählen (**Bild 1**). Geben Sie dazu einfach den Hostnamen des Geräts, in meinem Fall *raspberrypi*, in das PuTTY-Fenster ein und klicken Sie auf *Open*. Sie können auch die IP-Adresse des Raspberry Pi verwenden.

Sobald Sie eine Verbindung hergestellt haben, müssen Sie Ihren Anmeldenamen und Ihr Passwort für den Raspberry Pi eingeben. Es ist möglich, diese Anmeldedaten zu speichern, und da Sie dies häufig tun werden, wird dies empfohlen.

In der Vergangenheit mussten wir `sudo raspi-config` ausführen und *Camera* unter *Interface Options* aktivieren, aber bei den neueren Distributionen des Raspberry Pi OS wird die Kamera automatisch erkannt. Um die Kamera auf dem Headless-System zu testen, habe ich ein paar Pakete installiert:

```
sudo apt-get install -y libraspberrypi-bin
sudo apt-get install libcamera-apps
```

Nachdem ich mich wieder eingeloggt hatte, konnte ich die Kamera testen, indem ich ihre Live-Ausgabe direkt auf meinen Monitor schickte:

```
libcamera-hello
```

Das funktionierte, und es ist toll, die Live-Ausgabe der On-Board-Kamera auf dem Monitor zu sehen (**Bild 2**), aber das war's dann auch schon mit dem Erfolg des Hardware-Tests. Wir kommen später darauf zurück. Da ich neu gebootet habe, musste ich das Unterverzeichnis *tfllite1* erneut aufrufen und die virtuelle Umgebung starten. Durch viel Ausprobieren habe ich schließlich eine neue virtuelle Umgebung namens *new-tflite-env* erstellt und bin in diese virtuelle Umgebung eingetreten mit:

```
source new-tflite-env/bin/activate
```

Da dies eine Headless-Installation ist, musste ich *opencv-python-headless* in dieser Umgebung installieren:

```
pip3 install opencv-python-headless
```

Dann musste ich die empfohlenen Skripte aus der Anleitung, die ich mir auf GitHub angesehen habe, verwerfen, da die dort verwendeten Python-Methoden für ein Betriebssystem mit einer grafischen Benutzeroberfläche gedacht waren, die wir ja nicht haben. Wir brauchen das Paket TensorFlow Lite, das wir bereits installiert haben, sowie *numpy*. Zu diesem Zeitpunkt hatte ich bereits eine ganze Liste von Python-Paketen

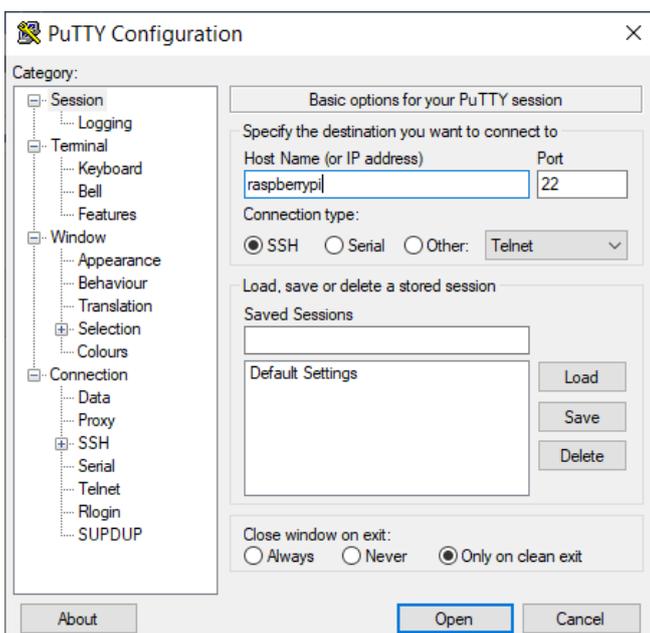


Bild 1. Die PuTTY-Benutzeroberfläche.



Bild 2. libcamera-hello sagt uns, dass unsere Kamera funktioniert.

installiert und war bereit, die nächsten Aufgaben zu übernehmen. Um zu sehen, welche Pakete Sie in Ihrer Umgebung installiert haben, geben Sie `pip3 list` an der Eingabeaufforderung ein. Meine Liste sieht wie die in **Bild 3** aus. Wenn Sie `numpy` noch nicht haben, installieren Sie es mit der gleichen Methode wie `opencv-python-headless` oben.

Testskript

Nun zum Testskript (**Listing 1**). Unser kleines Python-Skript verwendet den TensorFlow-Lite-Interpreter, um das Modell zu laden und die Objekterkennung auf den eingegebenen Bildern durchzuführen. Das Skript nimmt kontinuierlich Video-Frames von der Kamera auf, verarbeitet jedes Bild, um die Eingabeanforderungen des vortrainierten TensorFlow-Lite-Modells (`detect.tflite`) zu erfüllen, und verwendet dann das Modell, um Objekte in diesen Bildern zu erkennen. Erkannte Objekte mit einem Konfidenzwert von über 0,5 werden mit ihren Bezeichnungen, Konfidenzwerten und Bounding-Box-Koordinaten auf der Konsole ausgegeben. Das Skript verwendet OpenCV für die Videoerfassung und Bildvorverarbeitung und die Python-API von TensorFlow Lite für die Modell-Inferenz.

Die wichtigsten Bestandteile des Skripts sind:

- Initialisierung des TensorFlow-Lite-Interpreters: Lädt das `detect.tflite`-Modell und bereitet es für die Inferenz vor.
- Einrichtung der Videoerfassung: Initialisiert die Videoaufnahme mit der Webcam mit OpenCV (`cv2.VideoCapture(0)`).
- Vorverarbeitung der Bilder: Konvertiert die aufgenommenen Frames in RGB, passt ihre Größe an die Eingangsdimensionen des Modells an und packt sie in ein von TensorFlow Lite erwartetes Batch-Format.
- Objekt-Erkennung: Fügt die vorverarbeiteten Frames in das TensorFlow-Lite-Modell ein und ruft die Erkennungsergebnisse ab.
- Ergebnis-Verarbeitung: Iteriert über die Erkennungsergebnisse, filtert nach einem Konfidenzschwellenwert von 0,5 und druckt die Labels, den Konfidenzwert und die Bounding Box für jedes erkannte Objekt.

Das Skript ermöglicht eine Echtzeitverarbeitung für Anwendungen, die eine sofortige Rückmeldung über die Objekterkennung aus Video-Streams erfordern, wobei die erkannten Objekte und ihre Positionen im Bild mit Hilfe von Begrenzungsrahmen angezeigt werden. Wie viele Erkennungen Sie pro Sekunde durchführen können, hängt von der Leistung Ihres Raspberry Pi ab. Ich würde deshalb von einem Raspberry Pi 5 mehr erwarten als von seinem Vorgänger, den ich

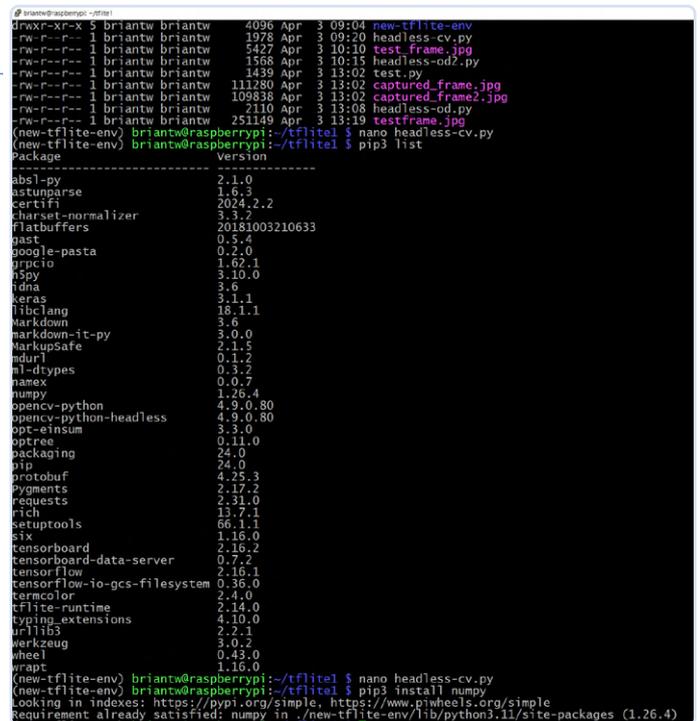


Bild 3. Die in meiner virtuellen Umgebung installierten Pakete.

verwende. Um das Skript auszuführen, geben Sie an der Eingabeaufforderung einfach Folgendes ein:

```
python3 objdet.py
```

Hürden

Das hört sich alles großartig an, aber als ich das Skript ausgeführt habe, hat es sich geweigert, irgendetwas zu erkennen. Schließlich habe ich versucht, den Confidence-Schwellenwert von 0,5 auf 0,2 zu reduzieren, und dann wurde nur noch „???“ mit unterschiedlichem Confidence-Werten erkannt. Zur Fehlersuche fügte ich direkt nach der Anweisung `cap.read()` eine Zeile hinzu, um das erfasste Bild in einer Datei zwischenspeichern:

```
cv2.imwrite('test_frame.jpg', frame)
```

Wenn ich das ausführe und die Ausgabe überprüfe, stelle ich fest, dass eine 5.427 Byte große Datei gespeichert wird, die laut Datei-eigenschaften so aussieht:

```
test_frame.jpg: JPEG image data, JFIF standard 1.01, aspect ratio, density 1x1, segment length 16, baseline, precision 8, 640x480, components 3
```

Auch wenn es sich um eine recht kleine Datei handelt, sehen die Eigenschaften eigentlich so wie erwartet aus. Dann wollte ich die Datei mit SCP in der Windows-Eingabeaufforderung

```
C:\Users\Brian>scp briantw@raspberrypi:/home/briantw/tflite1/test_frame.jpg
```

auf meinen PC übertragen, um sie dort anzusehen. Nach Eingabe des Passworts wird die Datei vom Raspberry Pi abgeholt und in das aktuelle Verzeichnis (.) in Windows geschrieben; in meinem Fall mein Standard-Benutzerverzeichnis. Als ich die Datei öffnete, war zu meiner großen Überraschung nichts als ein schwarzes Bild zu sehen.

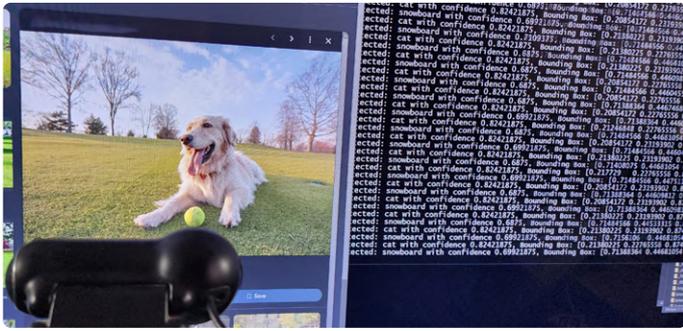


Bild 4. Eine Katze auf einem Snowboard.

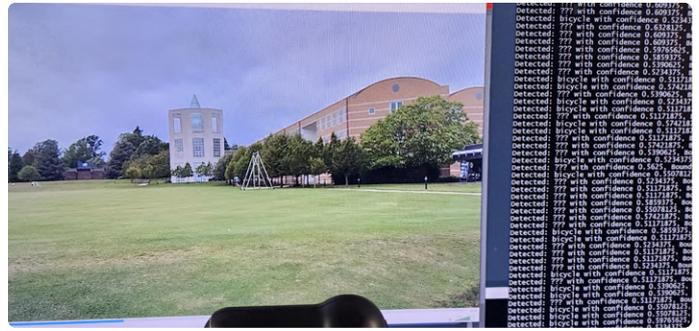


Bild 5. Kein einziges Fahrrad in Sicht.

Ich habe versucht, dieses Problem mit Hilfe von Google-Recherche und ChatGPT zu beheben, aber ich konnte die Kamera nicht dazu bringen, meinem Python-Skript etwas anderes als ein schwarzes Bild zu entlocken. Ich habe sogar versucht, sekundenlange Verzögerungen in den Code einzubauen, um der Kamera Zeit zum „Aufwärmen“ und zur Initialisierung zu geben - ohne Erfolg. Ich habe auch ein `update` und ein `upgrade` durchgeführt, und sogar die Firmware mit `sudo rpi-update` aktualisiert und dann einen `sudo reboot` durchgeführt. Seltsamerweise funktioniert die Kamera, wie `libcamera-hello` weiterhin beweist, also ist dies ein Software-Rätsel für mich. Schließlich holte ich aus Jux und Dollerei in Verzweiflung, wenn Sie so wollen, eine Logitech-Webcam von mir heraus und schloss sie an den Raspberry Pi an. Nachdem ich das System neu gestartet und die virtuelle Umgebung erneut aufgerufen hatte, führte ich das Skript erneut aus, und es funktionierte. Im Skript können Sie die verwendete Kamera auswählen, und wie Sie in Listing 1 sehen, heißt es:

```
# Initialize video capture from the camera
cap = cv2.VideoCapture(0)
```

Damit wird `cv2.VideoCapture()` angewiesen, die Kamera 0 zu verwenden. Nachdem ich die USB-Webcam angeschlossen hatte, wurde sie zur Kamera 0, und das im Raspberry Pi integrierte Kameramodul 3 wurde zur Kamera 2. Die Webcam (0) funktioniert also, und das eingebaute Raspberry-Pi-Kameramodul 3 (2) gibt nur ein schwarzes Bild aus.

Ergebnisse der Erkennung

Nun, da die Objekterkennung funktioniert, gibt das System aus, was es sieht. Ich habe meine Webcam auf alles Mögliche gerichtet, von Elektor-Titelbildern über Filme auf meinem Monitor bis hin zu Dingen in meinem Büro, und ich kann berichten, dass sie Fahrräder wirklich kann. Sie hat „Fernseher“, „Fernbedienung“ und „Topfpflanze“ gut erkannt, mit einigen Fehlalarmen, wie „Kuchen“ für meine Kameraluchte, und sie hat eine „Krawatte“ gefunden, wo keine war. In **Bild 4** sehen Sie, wie das System selbstbewusst einen Hund mit einem Ball betrachtet und eine Katze mit einem Snowboard erkennt. Wenn es dem System in den Szenen zu hektisch wird, greift es häufig zum „Fahrrad“.

Es gibt noch viel zu tun

Natürlich muss noch viel optimiert und verschiedene Modelle ausprobiert werden. Es ist sogar möglich, unsere eigenen Modelle zu trainieren. Und wie sieht es mit den Anwendungen aus? Ein Freund von mir hatte großen Erfolg mit der Erkennung von Personen in seinem Haussicherheitssystem mit OpenCV, während die Elektor-Ingenieure auch viele Einsatzmöglichkeiten bei der Objekterkennung in Live-Videos fanden, zum Beispiel die Untersuchung des YOLO-Objekterkennungsmodells anstelle von OpenCV [3]. Ich hingegen bin an der Klassifizierung von Objekten in archivierten Videos und Fotos interessiert. Wie ich schon beim letzten Mal erwähnt habe, habe ich Hunderte von

Stunden Videomaterial aus alten Fernsehnachrichten und ähnliches Material, das ich gerne kategorisieren würde, aber ich habe sicherlich nicht die Zeit, sie mir alle anzusehen und dabei sorgfältig Notizen zu machen. Ich würde sie gerne digitalisieren und die KI die gesamte Palette der Klassifizierungsaufgaben von der Objekterkennung bis zur Sprache-zu-Text-Transkription durchführen lassen, die alle in eine durchsuchbare Online-Metadaten-Datenbank aufgenommen werden. Während die Erkennungsgenauigkeit derzeit noch zu wünschen übrig lässt, ist das Tolle daran, dass man die Erkennungsquelle von der Live-Kamera auf eine Videodatei umstellen kann, indem man nur eine Zeile im Skript ändert, und zwar die mit dem `VideoCapture()`-Aufruf. Ich habe eine Beispieldatei ausprobiert, die letztes Jahr auf dem Gelände des Churchill-College in Cambridge aufgenommen wurde, und habe sie wieder mit SCP auf den Raspberry Pi hochgeladen:

```
C:\Users\Brian>scp 20230919_174323.mp4 brian@raspberrypi:/home/brian/tflite1/20230919_174323.mp4
```

Dann änderte ich die Zeile in Listing 1 in

```
cap = cv2.VideoCapture('20230919_174323.mp4')
```

und los ging es mit der Erkennung von Objekten im Video. Die gute Nachricht ist, dass es so einfach war, die Quelle zu wechseln, die schlechte, dass in dem Video kein einziges Fahrrad zu sehen war (**Bild 5**).

Das nächste Mal

Jetzt, wo das System läuft und in der Lage ist, Objekte zu erkennen, werde ich mich der Verbesserung der Genauigkeit zuwenden und verschiedene Modelle und deren Training untersuchen. Wenn ich Glück habe, bringe ich das System dazu, ansprechende Ergebnisse für einen produktiven Zweck zu liefern. Werde ich Glück haben? Wir werden sehen. ◀

RG – 230181-F-02

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

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

Über den Autor

Brian Tristram Williams ist von Computern und Elektronik fasziniert, seit er im Alter von zehn Jahren seinen ersten „Microcomputer“ bekam. Seine Reise mit Elektor begann, als er mit 16 Jahren seine erste Ausgabe kaufte. Seitdem verfolgt er die Welt der Elektronik und Computer, erforscht und lernt ständig dazu. Seit 2010 arbeitet er bei Elektor und hält sich gerne über die neuesten Technikrends auf dem Laufenden, insbesondere über künstliche Intelligenz und Einplatinencomputer wie den Raspberry Pi.



Listing 1: Testkamera und Objekterkennung

```
import cv2
import numpy as np
from tfLite_runtime.interpreter import Interpreter

# Initialize the TensorFlow Lite interpreter
model_path = 'Sample_TFLite_model/detect.tflite'
interpreter = Interpreter(model_path=model_path)
interpreter.allocate_tensors()
input_details = interpreter.get_input_details()
output_details = interpreter.get_output_details()
input_shape = input_details[0]['shape']

# Load labels
with open('Sample_TFLite_model/labelmap.txt', 'r') as file:
    labels = [line.strip() for line in file.readlines()]

# Initialize video capture from the camera
cap = cv2.VideoCapture(0)
while True:
    ret, frame = cap.read()
    if not ret:
        break

    # Preprocess the frame
    frame_rgb = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2RGB)
    frame_resized = cv2.resize(frame_rgb, (input_shape[1], input_shape[2]))
    input_data = np.expand_dims(frame_resized, axis=0)

    # Perform detection
    interpreter.set_tensor(input_details[0]['index'], input_data)
    interpreter.invoke()

    # Retrieve detection results
    # Bounding box coordinates of detected objects
    boxes = interpreter.get_tensor(output_details[0]['index'])[0]
    classes = interpreter.get_tensor(output_details[1]['index'])[0] # Class index of detected objects
    scores = interpreter.get_tensor(output_details[2]['index'])[0] # Confidence of detected objects
    count = int(interpreter.get_tensor(output_details[3]['index'])[0]) # Total number of detected objects

    # Loop over all detections and print detection info
    for i in range(count):
        class_id = int(classes[i])
        score = scores[i]
        bbox = boxes[i]
        # Filter out weak detections by ensuring the confidence is greater than a minimum threshold
        if score > 0.5:
            label = labels[class_id]
            print(f"Detected: {label} with confidence {score}, Bounding Box: {bbox}")

cap.release()
```

WEBLINKS

- [1] Brian Tristram Williams, „Erste Gehversuche mit TensorFlow“, Elektor 3/2024: <https://www.elektormagazine.de/magazine/elektor-334/62750>
- [2] PuTTY - Terminalprogramm für den Fernzugriff auf Headless-Computer: <https://putty.org>
- [3] Saad Imtiaz, „CaptureCount“, Elektor 3/2024: <https://www.elektormagazine.de/magazine/elektor-334/62744>

10-MHz-Referenzgenerator

Hochgenau, mit Verteiler und galvanischer Trennung

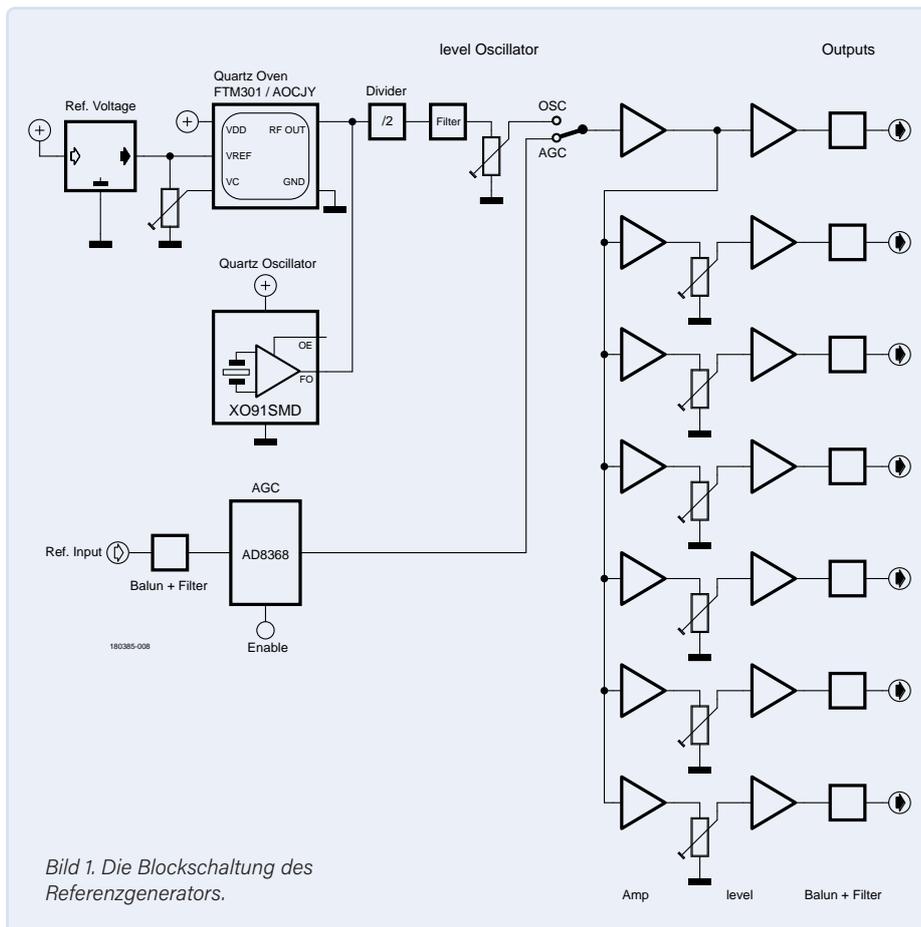
Von Alfred Rosenkränzer (Deutschland)

Müssen in komplexen Messaufbauten Frequenzen und/oder Zeiten erfasst werden und die Ergebnisse genau und vor allen Dingen zeitlich präzise aufeinander bezogen sein, sollten diese Messgeräte möglichst synchron laufen. Zu diesem Zweck koppelt man sie mit Hilfe einer hochgenauen Referenzfrequenz. In diesem Beitrag wird beschrieben, wie man solch einen Referenzgenerator selbst bauen kann.

Wenn keine anderen Gründe dagegen sprechen, wird in solchen Messaufbauten das Gerät mit der genauesten Zeitbasis zum Master erklärt und sein Ausgangssignal dient als Referenz für die anderen Geräte. Die Signalverteilung kann zum Beispiel in Form einer „Daisy Chain“ ausgeführt werden, indem jedes Gerät die Referenzfrequenz an seinem Eingang zu seinem Ausgang durchschleift, wodurch eine serielle Kette entsteht. Die Alternative ist eine Sternschaltung mit Hilfe eines Verteilerverstärkers, wodurch mehrere Referenzsignale quasi parallel zur Verfügung stehen. Als Referenz hat sich eine Frequenz von 10 MHz etabliert.

Masseprobleme

Ein häufig anzutreffendes Problem in solchen Messaufbauten sind Masseschleifen, die empfindliche Messungen stark stören können. Hintergrund: Die Massen der Ein- und Ausgangsbuchsen sind mit dem Schutzleiter (PE) der Netzbuchse, den Steckverbindern



der Datenschnittstellen (GPIB, USB) und den Massen der Buchsen der Referenzsignale verbunden. In den so entstehenden Masseschleifen können sich magnetische Störfelder einkoppeln oder Ausgleichsströme fließen, die die Nutzsignale durch unerwünschte Störsignale beeinträchtigen.

Bei Referenzsignalen kann eine Masseschleife durch galvanische Trennung mit Hilfe von HF-Trafos verhindert werden. Solche Trafos gibt es in kleinen Gehäusen mit BNC-Steckverbindern, zum Beispiel von Mini-Circuits. Sie müssen für eine Daisy-Chain-Anordnung zwischen jedes Gerät eingefügt werden. Bei Benutzung eines Verteilers wird solch ein Trafo zwischen Verteiler und jedem Referenzeingang eines Messgeräts eingeschleift. Verteiler mit integrierten HF-Ausgangstrafos

zum vereinfachten, massefreien Anschluss von Messgeräten scheint es derzeit auf dem Markt nicht zu geben. Dieses Manko inspirierte mich zur Entwicklung eines Referenzgenerators, der nicht nur mit einem hochgenauen, geheizten Oszillator bestückt ist, sondern mehrere massefreie Ausgänge bietet.

Prinzipschaltung

Die Blockschaltung des Generators ist in **Bild 1** zu finden. Links oben ist die Erzeugung des 20-MHz-Basistakts zu sehen, wahlweise mit einem einfachen Quarz-Oszillator oder einem aufwändigeren, kalibrierbaren Quarz-Ofen. Nach Halbierung auf 10 MHz und Filterung steht die Referenzfrequenz bereit zur Pufferung und Verteilung (rechte Seite). Alternativ kann die Schaltung auch lediglich



Stückliste

Widerstände:

(SMD 0603, wenn nicht anders angegeben)

R1, R3, R9, R53, R309, R314, R315 = 10k

R2, R310 = 4k7

R4 = 820 Ω

R5 = 0 Ω, SMD 2012 *

R6, R7 = 1k2

R8, R14, R52, R64, R75, R86, R97, R108, R123 = 390 Ω

R10, R17 = 100 Ω

R11, R18, R54, R57, R58, R61, R63, R66, R69, R72, R74, R77, R80, R83, R85,

R88, R91, R94, R96, R99, R102, R105, R107, R110, R115, R118, R121, R124,

R126, R129, R130 = 50 Ω

R13, R67, R68, R78, R79, R89, R90, R100, R101, R111, R112, R113, R114, R119,

R120, R307, R308, R318 = 0 Ω *

R15 = 130 Ω

R16 = 2k5, Mehrgang-Trimmpoti, stehend, RM 1/10"

R25 = 1k

R50 = 120 Ω

R51 = 200 Ω, Mehrgang-Trimmpoti, stehend, RM 1/10"

R55, R56, R60, R65, R71, R76, R82, R87, R93, R98, R104, R109, R116, R117,

R122, R127 = 470 Ω

R59, R70, R81, R92, R103, R128 = 330 Ω

R62, R73, R84, R95, R106, R125 = 500 Ω, Mehrgang-Trimmpoti, stehend,

RM 1/10"

R301, R306 = 150 Ω

R302, R305 = nb *

R303, R304 = 75 Ω

R311...R313 = 10 Ω, SMD 2012

R316 = 68 Ω

R317 = 180 Ω

Kondensatoren:

(SMD 0603, wenn nicht anders angegeben)

C1 = 4.700 μ / 16 V, Elko, RM 5 mm, ø 13 mm *

C2, C4, C8...C11, C19...C22, C34, C35, C51...C54, C56...C65, C82, C83 = 100n

C3, C5, C12...C18, C33, C36...C40 = 22 μ / 20 V, SMD SMCB

C6, C7 = 2.200 μ / 16 V, Elko, RM 5 mm, ø 13 mm

C23, C32 = 33p

C24 = 120p

C25, C90 = 5p6

C26 = 10p

C27 = 150p

C28, C31 = 100p

C29 = 12p

C30 = 39p

C66, C68, C70, C72, C74, C76, C78, C87 = 47p

C67, C69, C71, C73, C75, C77, C79, C88 = 3p3

C81, C89, C94 = 10n

C84...C86, C91...C93 = 1n

Spulen:

(Alle SMD 1210)

L1...L7, L301 = 4μ7

L8 = 1μ8

L9 = 1μ5

Halbleiter:

D1...D4 = SK56, Schottky, 60 V / 5 A, DO214AA *

D5...D8 = SK56, Schottky, 60 V / 5 A, DO214AA

D9, D10 = SK540, Schottky, 40 V / 5 A, DO214AC

D31 = 1N4148, SOD-123

LED1...LED3 = LED, SMD 0805

T1...T2 = 2N3904, SOT23-BEC

IC1 = 7805

IC2 = 7905

IC3 = LT1963AET-3.3 *

IC4...IC11 = MAX4392ESA, SOIC8

IC6 = MCP1525TT, SOT-23-3 *

U1 = AD8368ACPZ-WP, LFCSP-24 *

U2 = SN74LVC1G80DBVR, SOT-23-5 *

Y1 = AOCJY-20.000MHZ-F, SMD *

XO1 = XO91, 20 MHz, SMD *

Außerdem:

X1 = 2-pol. Schraubklemme, RM 5 mm

X5 = 3-pol. Schraubklemme, RM 5 mm

JP1, JP2 = 2-pol. Pinheader

Tr1 = Trafo 2 × 6 V, 2 × 300 mA, RM 20 mm, Platinenmontage *

Tr3 = Trafo 2 × 6 V, 2 × 233 mA, RM 27,5 mm, Platinenmontage

Tr51...TR81 = ADT1-1, HF-Trafo, SMD *

F1 = Sicherung 250 mA, 20 × 5 mm

Sicherungshalter für F1, Platinenmontage

K1 = Relais FTR-B4S, SMD

* siehe Text

als Verteilverstärker dienen. Falls man eine hochwertige externe Referenzfrequenz zur Verfügung hat, kann man diese am Referenzeingang links unten einspeisen. Nach Amplitudenstabilisierung durch einen speziellen HF-Verstärker (AGC) gelangt dieses Signal als Referenz an die Verteilverstärkerbank rechts.

Schaltung

Wie man in der Schaltung von **Bild 2** sieht, ist die Versorgung des Digital- und Analogteils getrennt. Die Takterzeugung wird vom 3,3-V-Netzteil rund um Tr1 und IC3 versorgt. Aus diesem Zweig wird auch die Heizung

eines eventuellen Quarzofens gespeist. Seine Bestückung sorgt dafür, dass man eine genaue und driftarme Referenzfrequenz erhält. Die Versorgung der analogen Verstärker erfolgt symmetrisch mit ±5 V von Tr3 und den beiden klassischen Spannungsreglern IC1 und IC2. Zwecks sauberer Spannungen sind über die Schaltung jede Menge kleine Entkopplungs-Elkos mit je 22 μF und 100-nF-Vielschicht-Kondensatoren verteilt. Die Pegelstabilisierung eines externen Referenzsignals per AGC erfolgt über den +5-V-Zweig, wobei kleine RC-Filter (R311/C85 und R312/C84) eingeschleift sind. Zwei LEDs auf der Platine

zeigen Betriebsbereitschaft an. Eine zusätzliche LED mit gleicher Funktion kann auf der Frontplatte montiert werden. Bei Bestückung aller Ausgangsstufen fließt ein Strom von rund 180 mA im ±5-V-Zweig.

Oszillatoren

Als Oszillator dient ein hochpräziser, beheizter Quarzgenerator des Typs FTM301 der Firma FOX oder alternativ zum Beispiel der Typ OH300-50503CF-020.0M [1] von Connor-Winfield (Y1 in Bild 2). Bei geringeren Qualitätsansprüchen genügt auch ein einfacher 20-MHz-Quarzoszillator (XO1 von Bild 2, [2]).

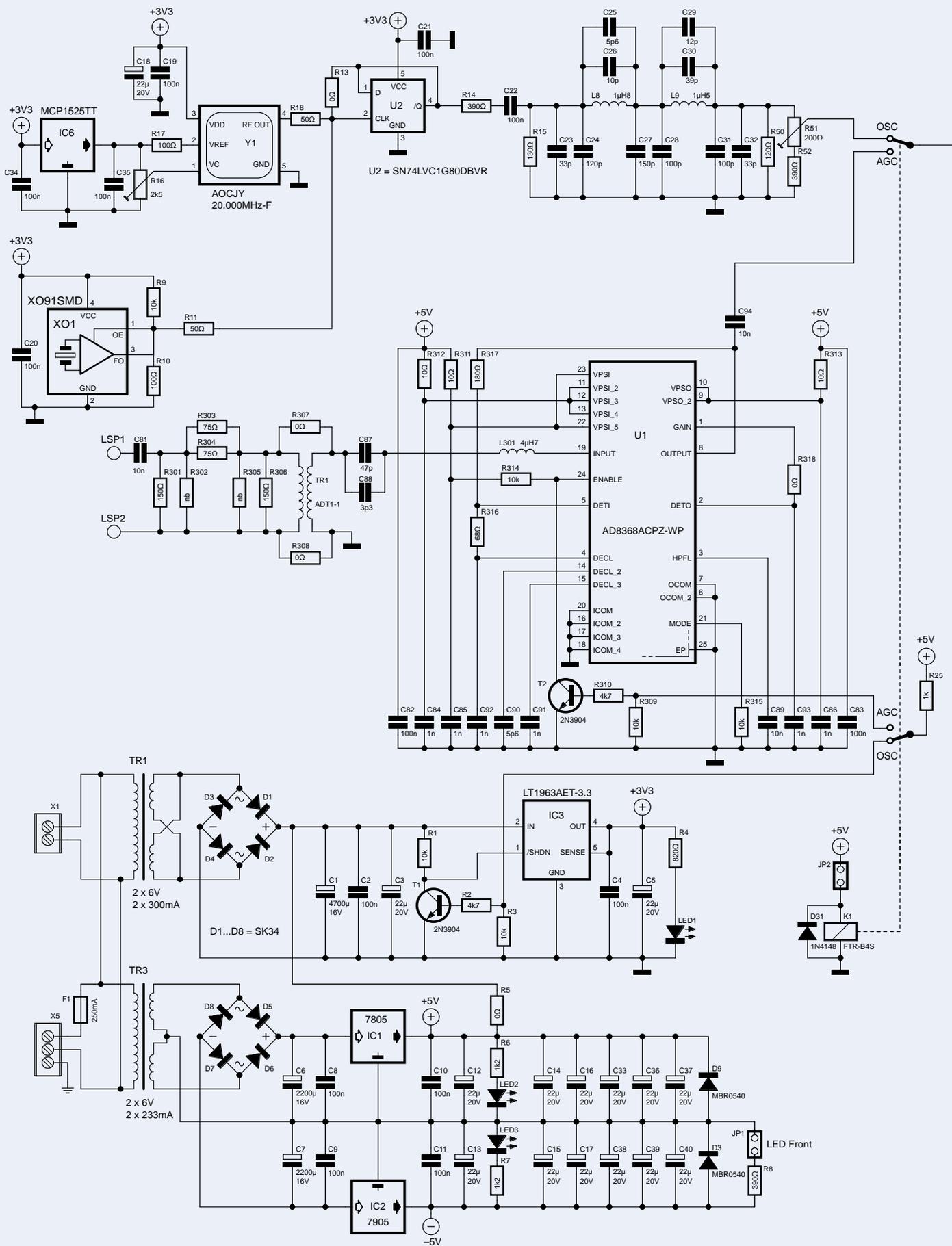
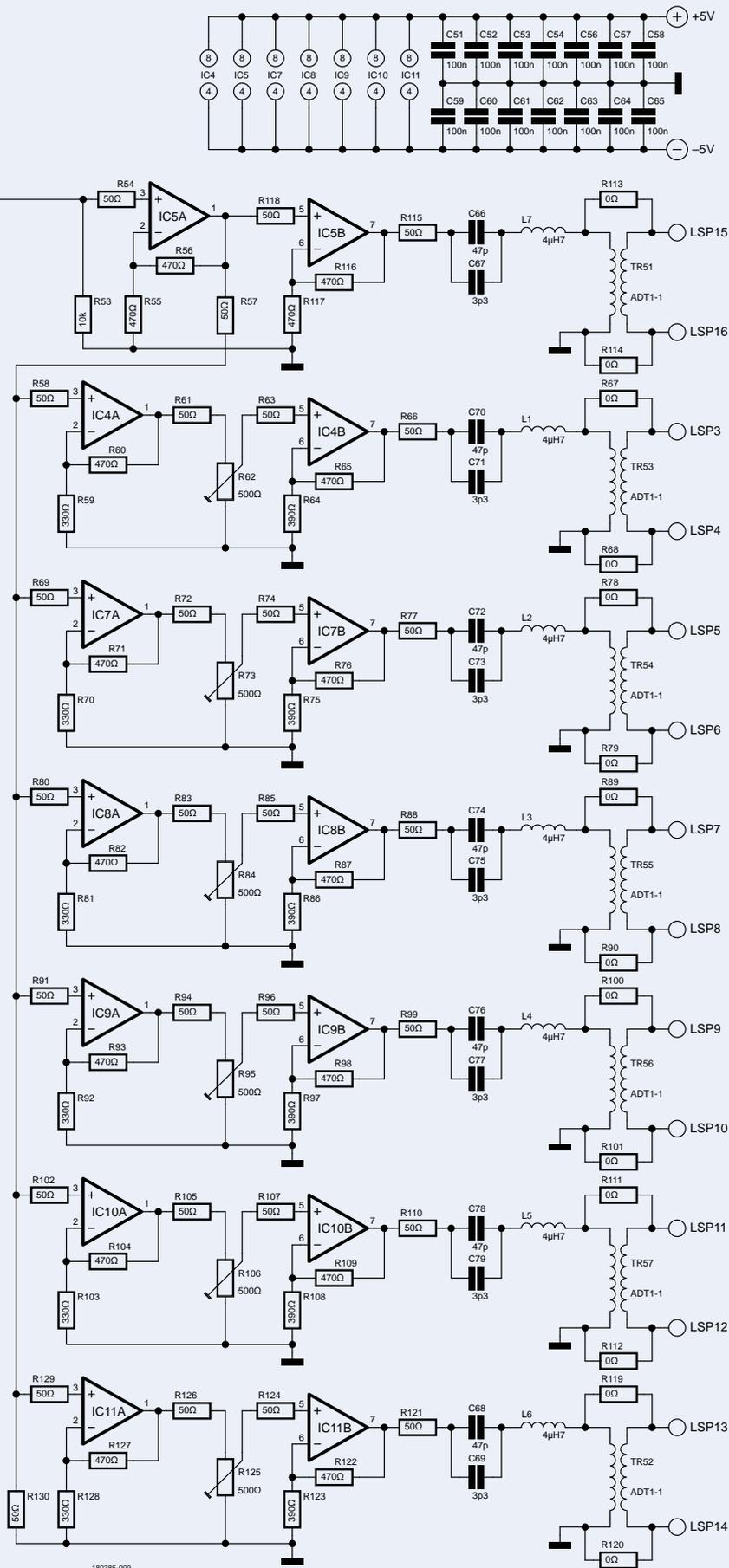


Bild 2. Die detaillierte Schaltung des Referenzgenerators ist etwas umfangreicher als die Blockschaltung, aber die sieben Ausgangsverstärker sind gleich aufgebaut.



Es wird natürlich nur eine der beiden Alternativen bestückt. Bei Bestückung von Y1 zieht die Schaltung nach dem Einschalten für einige Sekunden während des Aufheizens bis zu 800 mA aus dem 3,3-V-Zweig. Anschließend reduziert sich der Strom auf circa 350 mA. Über den Eingang VC (Pin 1) kann man die Frequenz von Y1 mit einer durch IC6 generierten und mit R16 einstellbaren Steuerspannung von 0...2,5 V in geringem Umfang beeinflussen. Bei Bestückung von XO1 statt Y1 kann man sich also IC6 samt Trimpoti R16 sparen. Manche Oszillatoren enthalten eine eigene Referenzspannung, die sich an Pin 2 abgreifen lässt. In diesem Fall kann IC6 entfallen und stattdessen R17 bestückt werden. Bei Oszillatoren ohne eigene Referenzspannung muss IC6 bestückt werden und R17 kann entfallen. Mit R16 lässt sich die Referenzfrequenz kalibrieren, wozu man selbstverständlich eine geeignete und vor allem hochpräzise Referenzfrequenz braucht.

Falls man keinen großen Wert auf absolute Genauigkeit legt, reicht auch der einfache und preiswerte Quarzoszillator XO1 im XO91-Gehäuse aus. Nochmals: Es darf nur ein Oszillator bestückt werden – Y1 oder XO1. Für XO1 benötigt man aufgrund der niedrigeren Stromaufnahme keinen zusätzlichen Trafo TR1 und auch der Gleichrichter aus D1...D4 entfällt. Stattdessen wird R5 bestückt, um die nötigen 3,3 V aus dem 5,5-V-Zweig abzuleiten. R11 wird bei Einsatz von XO1 und R18 bei Verwendung von Y1 bestückt.

Um ein optimales Tastverhältnis von 50 % des 10-MHz-Signals zu erreichen, werden die 20 MHz des primären Takterzeugers durch ein D-Flipflop geteilt. Eine Alternative stellt die Bestückung mit 10-MHz-Generatoren dar, wodurch U2 entfällt und sein Eingang durch Bestückung von R13 mit dem Ausgangspin verbunden wird. Das 10-MHz-Signal wird dann noch durch einen passiven Cauer-Tiefpass fünfter Ordnung um L8 und L9 von Oberwellen befreit, damit aus einem rechteckförmigen ein Sinussignal entsteht. Die Grenzfrequenz des Filters beträgt 11 MHz, seine Welligkeit nur 0,1 dB und seine Ein- wie Ausgangsimpedanz etwa 100 Ω. Der Spannungsteiler R14/R15 reduziert das Eingangssignal und C22 trennt die Gleichspannungsanteile (= halbe Betriebsspannung) ab.

R50, R51 und R52 schließen den Ausgang des Filters ab. Mit Trimpoti R51 lässt sich die Amplitude einstellen und an den Eingangspegelbereich der AGC anpassen.



Bild 3. Die teilbestückte Platine des Prototypen.

Mit dem Relais K1 und einem Schalter auf der Frontplatte kann man zwischen dem Signal des internen Generators und des Referenzeingangs wählen.

Verteilerverstärker

IC5A verstärkt das Signal um den Faktor 2 und verteilt es über eine mit 50 Ω (R130) abgeschlossene Leitung an sechs der sieben Ausgangsstufen, um Reflexionen auf den Leiterbahnen der Platine zu vermeiden und möglichst gleichen Pegel an allen Eingängen der sieben Ausgangsstufen zu erreichen. Der 50-Ω-Widerstand dieser Stufen dient der Entkopplung der Eingangskapazität der dort verbauten Opamps. Sechs dieser Stufen werden mit je zwei sogenannten Video-Opamps realisiert. Mit ihren 500-Ω-Trimpotentiometern lassen sich die Amplituden dieser sechs Kanäle individuell einstellen.

Der zweite Opamp von IC5 treibt über einen 50-Ω-Widerstand ein serielles Bandpassfilter aus den beiden parallelgeschalteten Kondensatoren C66 und C67 plus der Spule L7 und letztlich den HF-Trafo Tr51 vom Typ ADT1-1 [3]. Diese Ausgangsstufe hat kein Trimpoti und ihre Ausgangsspannung ist daher auch nicht einstellbar.

Generell gilt: Wenn man keine galvanische Trennung benötigt, kann man die HF-Trafos Tr51 bis Tr57 auch weglassen und stattdessen je zwei 0-Ω-Widerstände einsetzen. In meinem Prototyp habe ich Opamps des Typs MAX4392ESA [4] im SOIC8-Gehäuse benutzt. Man kann aber auch andere Videoverstärker verwenden, die für eine Stromversorgung von ±5 V geeignet sind.

Bei galvanischer Trennung und einer metallenen Front/Rückseite muss man logischerweise auf isolierte BNC-Buchsen achten!

Referenzeingang und AGC

Für diese Teilschaltung wird ein AGC-IC vom Typ AD8368 [5] von Analog Devices (U1) benutzt. Die Beschaltung von Bild 2 entspricht der Empfehlung des Datenblatts. Um den Eingang nicht zu übersteuern, ist vor den HF-Eingangstrafo Tr81 ein Dämpfungsglied von 6 dB geschaltet. Bei Verzicht auf die galvanische Trennung kann auch hier der Trafo entfallen und durch die beiden Widerstände R307 und R308 ersetzt werden. Die Pegelstabilisierung via AGC funktioniert mit Eingangssignalen von 70...2.000 mV_{SS} an 50 Ω. Kleinere Eingangspegel verringern den Ausgangspegel, größere Eingangspegel vergrößern ihn.

Das Netzteil

Nach dem Einschalten der Schaltung mit kaltem Quarzofen fließt deutlich mehr Strom als später im wohltemperiertem Zustand. Daher ist ein relativ kräftiger Trafo mit Schottky-Dioden und großem Sieb-Elko vorgesehen. Per Low-Drop-Regler LT1963AET-3.3 (Analog Devices) werden die stabilisierten 3,3 V erzeugt. Der Regler muss gekühlt werden. Zu diesem Zweck kann man ihn isoliert an die Rückwand eines Alugehäuses schrauben. Seine Ausgangsspannung lässt sich über den Shutdown-Eingang abschalten, wenn man gerade die externe Referenzfrequenz nutzen und die Schaltung nur als Verteilerverstärker betreiben will. Diese Maßnahme verhindert Interferenzen zwischen dem internen Generator- und dem externen Referenzsignal. Relais K1 wird von einem Schalter auf der Frontplatte gesteuert, der an JP2 angeschlossen wird. Ein Umschaltkontakt des Relais wählt das Eingangssignal für den Verteilerverstärker, der andere Kontakt steuert über T1 den



Bild 4. Eine teilbestückte Platine eingebaut in ein Teko-Gehäuse.

SHDN-Eingang von IC3 und über T2 den ENBL-Eingang der AGC.

Noch ein Hinweis zum Aufbau: Eine gute thermische Isolierung des Quarzofens verringert seine Stromaufnahme. Spätestens nach 30 Minuten hat er seine maximale Genauigkeit erreicht.

Bestückungsoptionen

Wie bereits deutlich wurde, lässt die Platine mehrere Bestückungsoptionen zu. In der Stückliste sind die optionalen Bauteile mit einem Sternchen versehen. Die Bestückungsoptionen sind der Übersichtlichkeit halber hier noch einmal präzisiert:

Quarzofen oder einfacher Quarzgenerator

Für den Quarzofen Y1 müssen Tr1, die Dioden D1...D4 und C1 bestückt sein. R5 entfällt. Für XO1 entfallen Tr1, D1...D4 und C1. Stattdessen wird R5 bestückt.

Oszillator mit 20 MHz oder 10 MHz

Bei 20-MHz-Oszillatoren muss der Teiler U2 bestückt werden. R13 entfällt. Bei 10-MHz-Oszillatoren entfällt U2. R13 muss bestückt werden.

Referenzspannung des Quarz-Ofens

Hat der Quarzofen eine interne Referenzspannungsquelle so entfällt IC6 und R17 müssen bestückt werden.

Ohne interne Referenzspannungsquelle wird IC6 benötigt. R17 sollte in diesem Fall nicht bestückt sein.

Interne, externe Frequenzerzeugung oder beides

Es können lediglich die internen Oszillatoren oder der Eingang für eine externe Referenz mit

AGC oder auch beide Teile bestückt werden. Bei Benutzung eines internen Generators wird die AGC ausgeschaltet. Bei Benutzung des externen Eingangs mit AGC werden die 3,3-V-Stromversorgung und damit die Oszilatoren und der Teiler abgeschaltet.

Galvanische Trennung

Falls eine galvanische Trennung nicht erforderlich sein sollte, können die HF-Trafos entfallen. Dafür müssen dann jeweils die beiden 0-Ω-Widerstände pro Trafo zu dessen Überbrückung bestückt werden. In diesem Fall muss man auf die richtige Polarität beim Anschluss der BNC-Buchsen achten.

R302 und R305

Diese Widerstände dienen dazu, in Parallelschaltung zu R301 und R306 auch „krumme“ Werte zu erreichen. Für die hier vorgesehene Dämpfung von 6 dB sind die angegebenen Werte von R301 beziehungsweise R306 genau genug. R302 und R305 können somit entfallen.

Aufbau

Bild 3 zeigt die teilbestückte Platine, deren Layout-Dateien im Eagle-Format von der Elektor-Webseite [6] kostenlos heruntergeladen werden können. In **Bild 4** ist eine in ein Teko-Gehäuse eingebaute Platine zu sehen. Wie schon erwähnt, sollten die BNC-Buchsen bei galvanischer Trennung isoliert eingebaut werden. Der in diesem Beitrag beschriebene Referenzgenerator ist vielseitig einsetzbar, sehr genau und vermeidet Masseschleifen in komplexen Testaufbauten. Beim Autor sind übrigens noch einige Leerplatinen erhältlich. ◀

180385-02

Sie haben Fragen oder Kommentare?

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

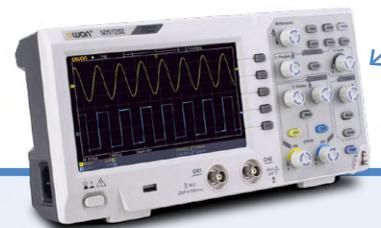
Über den Autor

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 Anlogschaltungen für IC-Tester. Das Thema Audio ist sein privates Steckenpferd.



Passende Produkte

- > Joy-IT JDS6600 Signalgenerator & Frequenzzähler
www.elektor.de/18714
- > OWON SDS1202 2-Kanal-Oszilloskop (200 MHz)
www.elektor.de/20251



WEBLINKS

- [1] Datenblatt OH300-50503CF-020.0M: <http://tinyurl.com/4j6bzrzd>
- [2] Datenblatt AOCJY-20.000MHZ: <http://tinyurl.com/4v4n23y4>
- [3] Datenblatt HF-Trafo: <http://tinyurl.com/4fzxkfy>
- [4] Datenblatt MAX4392: <https://www.analog.com/en/products/max4392.html>
- [5] Datenblatt AD8368: <https://www.analog.com/en/products/ad8368.html>
- [6] Elektor-Webseite zu diesem Artikel: <http://www.elektormagazine.de/180385-02>

CONNECTED.
NO MATTER
THE CONDITIONS.



**WÜRTH
ELEKTRONIK**
MORE THAN
YOU EXPECT

WE meet @ PCIM Europe
Halle 6 - 342

Die IP67 & IP68 geschützte Industrie-Steckverbindung

Entdecken Sie hochwertige Rundsteckverbinder, die für anspruchsvolle Umgebungen entwickelt wurden. Mit ihrer Schutzart gewährleisten unsere Steckverbinder zuverlässige Verbindungen für Anwendungen wie Feldbusse, Aktoren/Sensoren und Robotik.

Bereit zum Design-In? Nutzen Sie den persönlichen technischen Support und kostenlose Muster ab Lager. www.we-online.com/circular

Highlights

- Neues M12 A Steckverbinder-Portfolio
- Mit Schutzart IP67 und IP68 für den Einsatz in anspruchsvollen Umgebungen geeignet
- Stecker- und Buchsenvarianten verfügbar
- Erhältlich mit den Polaritäten 4, 5 und 8

#CIRCULARCONNECTORS



Projekt-Update #2: Energienmessgerät mit ESP32

Einige Weiterentwicklungen



Bild 1. Rendering des neuen Gehäuseentwurfs des ESP32-Energiezählers.

Von Saad Imtiaz (Elektor)

Im letzten Update dieses Projekts haben wir die Schaltpläne und die Strategien zur Isolationsbarriere des ESP32-Energiezählers besprochen. Es gibt aber weitere Verbesserungen, einen Entwurf für ein Platinenlayout und einiges mehr zu behandeln.

Im Jahr 2023 begannen wir das Projekt mit dem Ziel, einen zuverlässigen und benutzerfreundlichen Energiezähler auf der Basis eines ESP32-Mikrocontrollers zu entwickeln. In unserem letzten Artikel im Januarheft [1] haben wir das Blockschaltbild, die detaillierte Schaltung, die Maßnahmen zur elektrischen Isolation, die Funktionen und die Projektstrategie besprochen. Rekapitulieren wir dies kurz, bevor wir mit dem nächsten Projekt-Update beginnen.

Das wichtigste Ziel bestand darin, einen präzisen und effizienten Energiezähler zu entwickeln, der die Fähigkeiten des ESP32-Mikrocontrollers von Espressif und des ATM90E32AS zur Energiemessung nutzt. Das Projekt sollte durch einen sorgfältigen Schaltungsentwurf nicht nur benutzerfreundlich und zuverlässig sein, sondern durch eine elektrische Trennung der verschiedenen Schaltungsteile in Form eines ADuM3151 eine sichere Kommunikation zwischen dem ESP32 und dem ATM90E32AS von Atmel (jetzt Microchip) gewährleisten. Der Schwerpunkt lag auf Sicherheit und Effizienz durch die Einbeziehung von Techniken zur Rausch- und Störunterdrückung, Verbesserung der Signalintegrität und Schutzmechanismen wie Sicherungen und Varistoren. Durch Einbeziehung zukunftssicherer Funktionen zur Integration von Fernüberwachungs- und Datenanalysetools sollte das Gerät ein verbessertes Energiemanagement ermöglichen und Einblicke in die Effizienz von elektrischen Verbrauchern gewähren.

In diesem Update wollen wir von den Hauptzielen nicht abrücken, aber es wurden zahlreiche Änderungen vorgenommen, um das Projekt

sicherer zu machen, die Produktionskosten zu senken und letztendlich die Größe des Geräts zu reduzieren. Bislang sind wir von einer Prototyp-Platine mit den Abmessungen 100 mm × 100 mm ausgegangen. Nach den Tests wurden einige Bauteile entfernt und das Layout der Platine optimiert, so dass die Größe der neuen Version auf 79,5×79,5 mm reduziert werden konnte – und das sind etwa 20 % weniger. In **Bild 1** ist das neue Gehäuse für die neue Platinenversion zu sehen.

Um den ESP32-Energiezähler sicherer zu machen, wird die Schaltung nicht mehr direkt aus der Netzspannung versorgt. Stattdessen reduziert ein Niederspannungstransformator die 230-V-Netzspannung auf ein sicheres Maß von 12 V. Diese Spannung wird sowohl für die Spannungsabtastrung als auch für Stromversorgung der Schaltung eingesetzt. Durch den Transformator hat man sich zwar einige Nachteile in Bezug auf die Phasenverzögerung eingehandelt, aber Sicherheit geht vor! Und da es nicht um die Messung von schnellen Spannungsspitzen oder Überspannungen geht, sondern um die Messung von Energie, sollte dies keinen Einfluss auf unsere Messung haben.

Der aktualisierte Schaltplan

Als erste Maßnahme haben wir den ESP32 durch einen ESP32-S3 ersetzt, der mehr Potenzial und erhebliche Verbesserungen für das Energiemeter bereitstellt. Der ESP32-S3 bietet gegenüber seinem Vorgänger ESP32 eine verbesserte Rechenleistung, KI- und Signalverarbeitungsfunktionen, mehr Speicher und bessere Sicherheitsfunktionen. Dazu wurden die Design-Richtlinien von Espressif [2] und andere nützliche Internet-Ressourcen [3...6] genutzt. In **Bild 2** ist der modifizierte Schaltplan des Projekts zu sehen.

Auch das Platinenlayout wurde optimiert, um die Sicherheit, Benutzerfreundlichkeit und Effizienz des ESP32-S3 zu verbessern. Es wurden wesentliche Anpassungen vorgenommen, um die Platine zu verkleinern und dadurch eine kompaktere Grundfläche zu erhalten. Zu den Anpassungen gehört der Gebrauch eines Netztrafos für die Stromversorgung, um die Sicherheit zu erhöhen. Das Gerät ist jetzt für ein- und dreiphasige Messungen vorbereitet und damit viel vielseitiger. Die Verwendung des effizienteren Abwärtswandlers AP63203WU-7 anstelle von Hi-Link-Modulen sowie benutzerfreundlicher USB-C- und Qwiic-Erweiterungsanschlüsse trugen zur Weiterentwicklung des Projekts

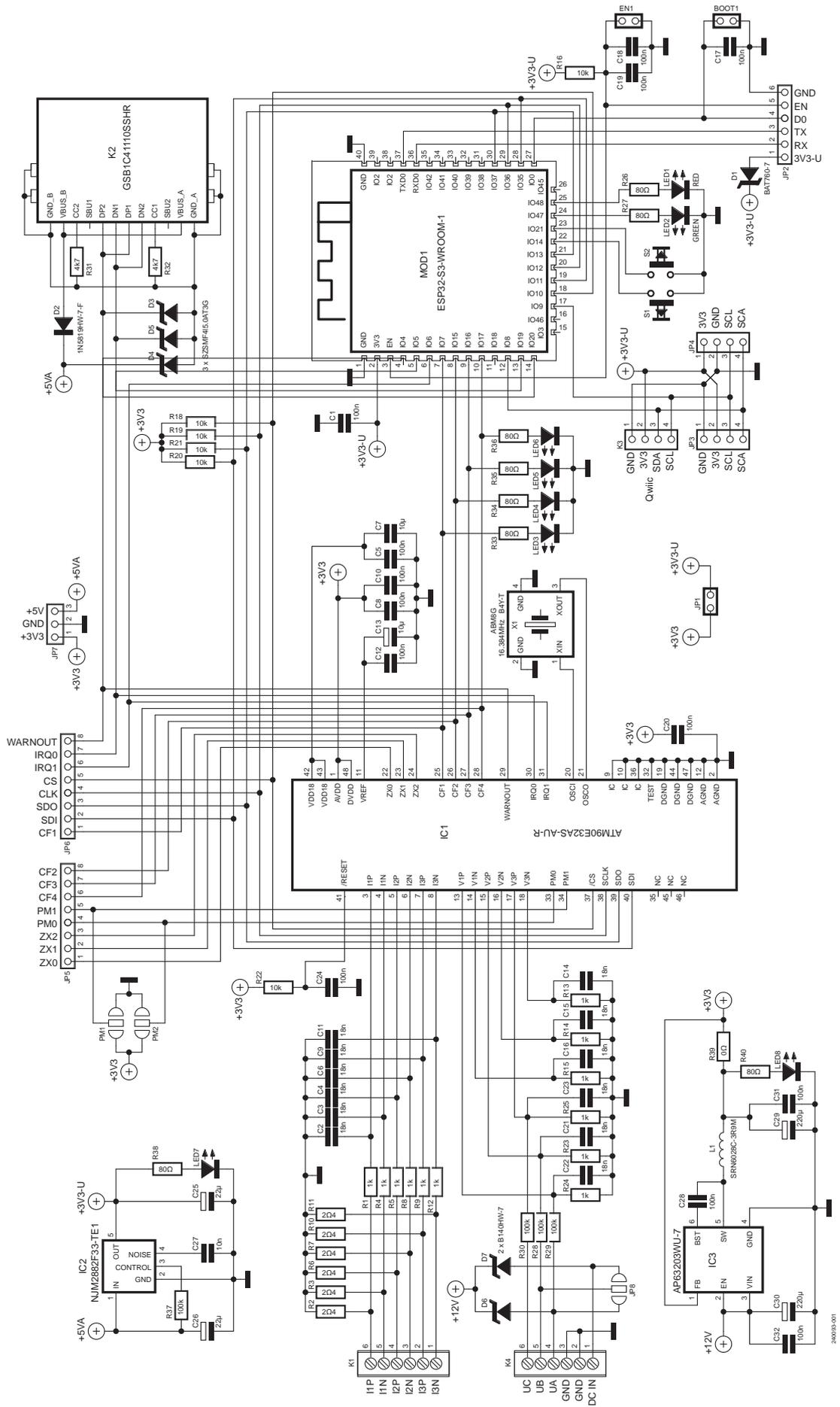


Bild 2. Schaltung des Projekts.

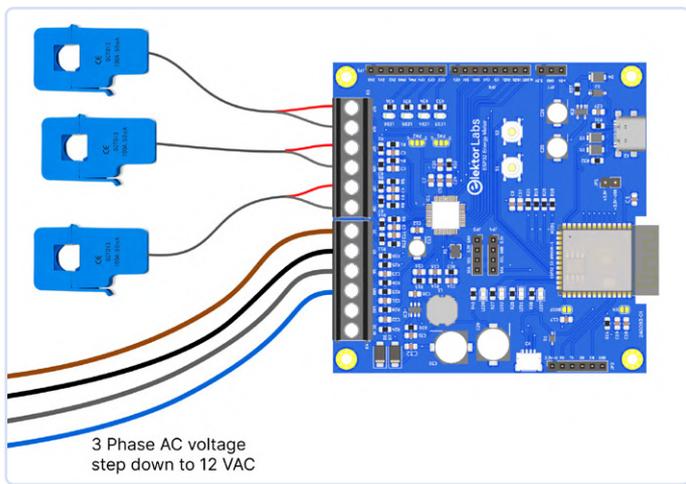


Bild 3. Gesamtv drahtung eines dreiphasigen Messsystems mit Stromwandlern und dem ESP32-Energiezähler.

bei. Diese Verbesserungen bauen auf den Fähigkeiten des ESP32-S3 auf und konzentrieren sich auf die Bereitstellung einer praktischen, anpassungsfähigen und sicheren Lösung zur Energieüberwachung.

Verfeinerte Spannungs- und Stromabtastung

IC1 ist nach wie vor derselbe ATM90E32AS, aber die Änderung besteht darin, dass sich zwischen der gefährlichen Netzspannung und dem Energie-Monitoring-IC jetzt ein Netztransformator mit einer 12-V-Sekundärwicklung befindet. Durch diese Änderung kann das Projekt sicherer getestet und eingesetzt werden, da 12 V nicht nur ungefährlich sind, sondern der Trafo auch eine galvanische Trennung zur Netzspannung gewährleistet. Bei meinen Tests konnte ich keinen nennenswerten negativen Einfluss des Trafos ausmachen.

Für jeden der Spannungsabtastungseingänge von IC1 gibt es jetzt also nur noch einen 100-k Ω -Widerstand (R28 bis R30). Beim letzten Mal haben wir die Spannungen aller Außenleiter in einem Eingang zusammengefasst, aber viele Leser haben sich die Möglichkeit gewünscht, den Eingang bei Bedarf sowohl in einem dreiphasigen als auch mit einphasigen Netz zu verwenden. Wir haben darüber nachgedacht, und jetzt können wir die Schaltung mit beiden Fällen verwenden. Standardmäßig ist der dreiphasige Modus eingestellt, aber wenn man ihn einphasig machen möchte, muss der Jumper JP8 kurzgeschlossen werden. **Bild 3** zeigt die prinzipielle Verdrahtung für ein dreiphasiges System. Die Spannungen auf den Außenleitern (gegen den blauen Neutralleiter) werden dabei von kleinen (Klingel-) Trafos auf 12 VAC herabgesetzt. Nicht, dass Sie auf dumme Gedanken kommen: Auch der Neutralleiter wird vom Trafo getrennt!

Für die Stromabtastung und -messung wird anstelle der Kopfhörerbuchse der Schraubklemmenblock K1 mit einem Raster von 5,08 mm verwendet. Dies trägt zur allgemeinen Robustheit des Energiemessgeräts bei. Als Stromwandler wurde der Typ SCT013 (100 A / 50 mA) von der Firma YHDC gewählt; die Widerstände R1...R12 an den drei Stromsensoreingängen setzen gemäß Datenblatt den Ausgangsstrom in eine entsprechende Spannung um.

Optimierung der Stromversorgung

Der Energiezähler wird jetzt vom Abwärtsschaltregler IC3, einem AP63203WU-7 von Diodes Incorporated versorgt. Die ursprünglichen Hi-Link-Module HLK5M05 haben sich als viel zu sperrig und viel zu teuer erwiesen. Der Abwärtswandler ist effizienter als die Hi-Link-Module, kostet weniger und ist viel kleiner. Zu Entwicklungs- und Testzwecken kann man den Schaltregler auch mit 12 VDC an K4 versorgen, während im Normalbetrieb die Betriebsspannung von L1 (UA an K4) stammt.

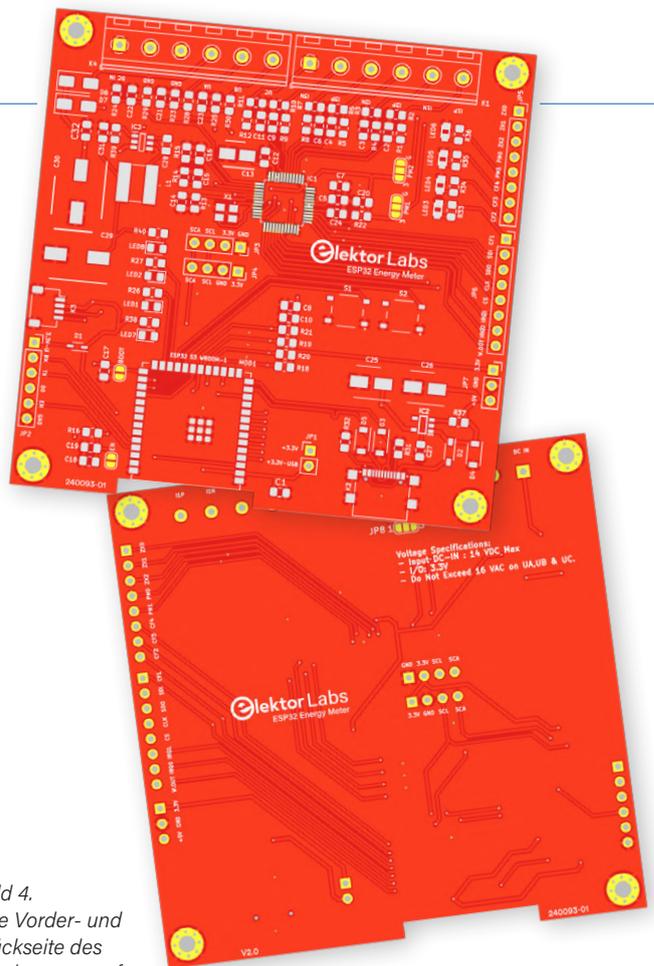


Bild 4. Die Vorder- und Rückseite des Platinenentwurfs.

Interaktive und modulare Funktionen

An die Ausgänge CF1 bis CF4 (für Wirkleistung, Blindleistung, Grundwellenleistung und Harmonische Leistung) wurden LEDs angeschlossen [7][8]. Für die Auswahl des Leistungsmodus von IC1 wurden die Jumper PM1 und PM2 hinzugefügt.

In dieser Version werden alle Ausgangspins des ATM90E32AS auf die Klemmen JP5 und JP6 der MCU zur Verfügung gestellt. Dadurch kann der Energiezähler auch als Modul mit einer anderen MCU verwendet werden, wenn der ESP32-S3 nicht zum Einsatz kommen soll.

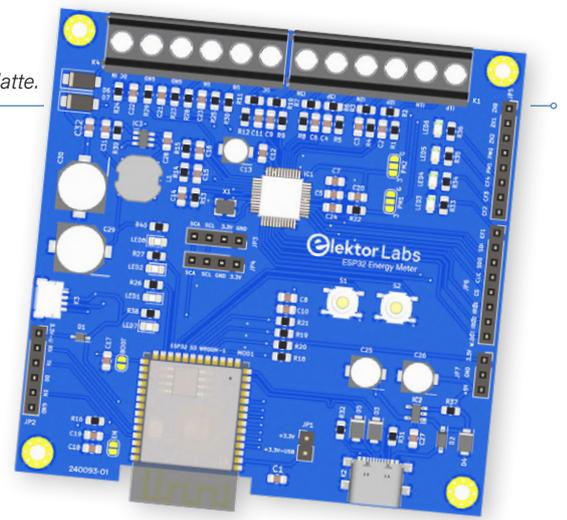
Der ESP32-S3 besitzt USB-Funktionalität, so dass es sehr bequem ist, die MCU auf diese Weise zu programmieren, weshalb wir den USB-C-Anschluss K2 hinzugefügt haben. Für die Fehlersuche wurde der Anschluss JP2 hinzugefügt. Die Status-LEDs LED1 und LED2, die vom ESP32-S3 gesteuert werden, und die Drucktasten S1 und S2, um mit dem OLED-Display zu interagieren, stellen die Benutzerschnittstelle dar. Aufgepasst, bei einigen I²C-OLED-Displays liegt auf Pin 1 Masse, bei anderen ist es die 3,3-V-Versorgung. Mit JP3 und JP4 ist das Energiemesssystem für beide Varianten gerüstet.

Schließlich gibt es den Qwiic-Anschluss K3, über den sich die Funktionalität des Energiemessers erweitern lässt, falls man zusätzliche Sensoren oder Module zu diesem Projekt hinzufügen möchte.

Das Platinenlayout

Das Platinenlayout wurde sorgfältig auf Kompaktheit und einfaches Löten hin optimiert, wie in **Bild 4** bewiesen wird. Auf der Oberseite sind die Anschlüsse für die Spannungs- und Strom-Sampling strategisch an einer Stelle positioniert, die eine Integration in ein DIN-Hutschienengehäuse zulässt. Auf der rechten Seite erleichtern Stiftleisten im Raster 2,54 mm den Anschluss eines externen Mikrocontroller-Boards, was einen modularen Aufbau des Messgeräts erleichtert. In der Mitte befindet

Bild 5. 3D-Modell der bestückten Leiterplatte.



sich der Anschluss für ein OLED-Display, flankiert von Drucktasten für eine intuitive Bedienung. Neben dem OLED-Display sorgen Stromversorgungs- und Status-LEDs für eine unmittelbare visuelle Rückmeldung, während die Energie-Impulsausgangs-LEDs zur direkten Überwachung bequem in der Nähe der MCU-Ausgangsklemmen angeordnet sind. Der USB-C-Anschluss und das ESP32-S3-Modul sind von den Bereichen mit Wechselspannung weit entfernt, was der Sicherheit zugutekommt. Ein Keramikkondensator neben dem 3-V-Eingang des ESP32-S3 dient der Entkopplung und reduziert eventuelles Rauschen deutlich. Außerdem sind Elektrolytkondensatoren in den Entwurf aufgenommen, die die Stromversorgung weiter stabilisieren und die Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit der Schaltung gewährleisten. Dieses Layout erleichtert den Montageprozess und verbessert die Funktionalität und Benutzerfreundlichkeit durch eine klare und logische Anordnung der Bauteile. In **Bild 5** sehen Sie das Rendering der bestückten Platine.



Achtung, in diesem Projekt haben Sie es mit gefährlicher Netzspannung zu tun! Personen, die keine Erfahrung mit Netzspannungen haben, sollten dieses Projekt nicht in Angriff nehmen oder jemanden mit Erfahrung fragen, der ihnen bei diesem Projekt helfen kann!

Nächste Schritte, weitere Aussichten

Nach der Prototypen-Phase mit dem ursprünglichen Schaltplan haben wir mehrere Verbesserungen vorgenommen, um die Zuverlässigkeit des ESP32-Energiemessers zu erhöhen. Derzeit konzentrieren wir uns auf die Weiterentwicklung der Firmware.

Das neueste Platinenlayout wurde zur Produktion verschickt, und wir erwarten es bald zurück, um umfangreiche Tests zur Zuverlässigkeit des Systems durchzuführen. Gleichzeitig wird die Softwareentwicklung vorangetrieben, um die Fähigkeiten des ESP32-S3-Moduls in unserem Energiezähler zur Gänze auszuschöpfen.

Für die Zukunft planen wir, den ESP32-Energiezähler in den Home Assistant einzugliedern, um die Benutzerfreundlichkeit zu erhöhen. Nichtsdestotrotz sind wir auch bestrebt, eine maßgeschneiderte Firmware zu entwickeln, um das Potenzial des Geräts voll auszuschöpfen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Projekt sowohl mit Hardware- als auch mit Softwareverbesserungen vorankommt. Unser Ziel bleibt es, eine zuverlässige und effiziente Lösung für die Energiemessung bereitzustellen. Dieses Projekt ist auch auf Elektor-Labs [9] zu finden, also zögern Sie nicht, dort Kommentare und Beiträge zu hinterlassen! ◀

RG — 240093-02

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Wenn Sie technische Fragen zu diesem Artikel haben, senden Sie bitte eine E-Mail an den Autor unter saad.imtiaz@elektor.com oder an das Elektor-Redaktionsteam unter redaktion@elektor.de.

Über den Autor

Saad Imtiaz (Senior Engineer, Elektor) ist ein Mechatronik-Ingenieur mit Erfahrung in den Bereichen Embedded-Systems, mechatronische Systeme und der Produktentwicklung. Er hat mit zahlreichen Unternehmen, von Startups bis hin zu Weltkonzernen, bei der Entwicklung von Produktprototypen zusammengearbeitet. Saad hat auch einige Zeit in der Luftfahrtindustrie verbracht und ein Technologie-Startup-Unternehmen geleitet. Seit kurzem ist er bei Elektor tätig und treibt die Projektentwicklung sowohl im Bereich Software als auch Hardware voran.



Passende Produkte

- ▶ **Qoitech Otii Arc - Stromversorgung, Leistungsmesser und Datenerfassung**
www.elektor.de/19270
- ▶ **ESP-Terminal**
www.elektor.de/20526
- ▶ **Arduino Nano ESP32**
www.elektor.de/20562

WEBLINKS

- [1] Saad Imtiaz, „Projekt-Update: Energiemessgerät mit ESP32“, Elektor 1/2024:
<https://www.elektormagazine.de/magazine/elektor-325/62700>
- [2] Blockschaltbild ESP32 S3 DevKitC-1 (PDF): <https://t1p.de/oa83w>
- [3] ESP32 S3 Pinout Hilfe: <https://luisllamas.es/en/which-pins-can-i-use-on-esp32-s3>
- [4] Schaltplan V2.1ESP32-S3-USB-Bridge (PDF): <https://tinyurl.com/usbridgeschematic>
- [5] ESP32-S3 Pinbelegung: http://wiki.fluidnc.com/en/hardware/ESP32-S3_Pin_Reference
- [6] ESP32-S3: Welche Pins soll ich verwenden?: <https://atomic14.com/2023/11/21/esp32-s3-pins.html>
- [7] Applikationsschrift AN_46103 Poly-Phase Energy Metering IC: <https://t1p.de/vyuph>
- [8] Atmel-Datenblatt M90E32AS: <https://www.mouser.de/c/?q=M90E32AS>
- [9] ESP32-Energiemessgerät auf Elektor Labs:
<https://elektormagazine.de/labs/esp32-energy-meter-an-open-source-solution-for-real-time-energy-monitoring>

Projekt 2.0

Korrekturen, Updates und Leserbriefe

Zusammengestellt von Jean-François Simon (Elektor)



Röhren-Vorverstärker Elektor 9/2003 (020383)

Hallo, ich würde gerne wissen, ob es noch möglich ist, die Siebdruck-Vorlage der Frontplatte dieses Vorverstärkers zu erhalten. Außerdem kann ich die Eingangsschaltrelais nicht finden. Es sind acht Stück, im Artikel ist die Conrad-Referenz RFA 504602 angegeben. Könnten Sie mir bitte helfen? Ich danke Ihnen vielmals!
Jean-Paul Termonia (Frankreich)

Die für diesen Teil der Schaltung benötigten Relais sind Reed-Relais mit einer Kontaktreihe (SIP), 5,08-mm-Raster, 12-V-Spule, Typ MES1A12 oder SIP-1A12 oder gleichwertig, siehe zum Beispiel: Conrad 2273680, Farnell 9561935, Digikey 3008-SIP-1A12-ND. Sie können die oben genannten Teilenummern auch bei eBay suchen. Was die Zeichnung der Frontplatte betrifft, so habe ich in unserem Archiv nachgesehen, aber leider ist sie nicht mehr verfügbar. Wir entschuldigen uns für die Unannehmlichkeiten!

Jean-François Simon (Elektor)



Transistor-Kennlinienschreiber

Elektor 02/2009, S. 20 (080068)

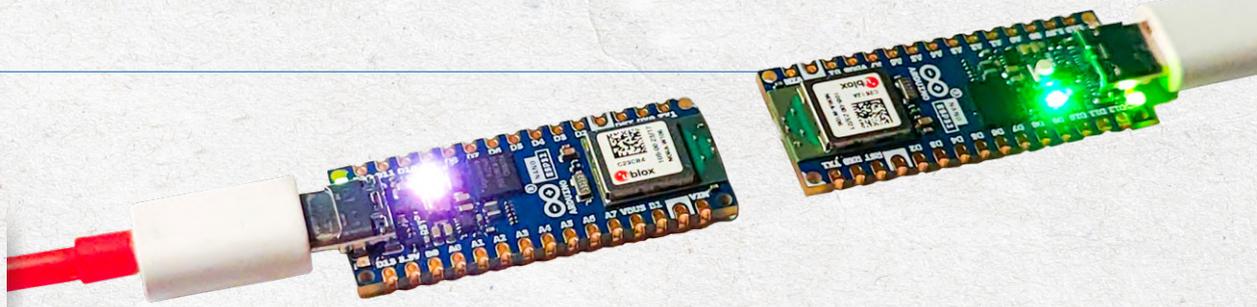
Nachdem mein Leserbrief in der letzten Ausgabe abgedruckt wurde, hoffe ich, dass auch meine aktuelle Anfrage beantwortet werden kann! Ich muss Kennlinien von alten Hitachi-MOSFETs ermitteln, damit ich sie selektieren kann. Es geht um den Crescendo und die Transistoren 2SK135/2SJ50. Können Sie mir sagen, ob der Transistor-Kennlinienschreiber aus 2/2009 das prinzipiell kann oder ob er nur für kleine MOSFETs geeignet ist? Oder haben Sie eine bessere Idee? Vielen Dank, und Grüße aus dem Münchner Osten!

Martin Vogl (Deutschland)

Prinzipiell können die von Ihnen genannten MOSFETs auch mit dem Transistor-Kennlinienschreiber bis zu einem Drain-Strom von 400 mA und einer Drain-Source-Spannung von 10 V selektiert werden. Wenn Sie den Kennlinienschreiber jetzt bauen wollen, bedenken Sie aber bitte, dass weder die Hauptplatine noch die dazugehörige Controller-Platine R8C/13 verfügbar sein dürften.
Rainer Schuster (Autor des Artikels)



Haben Sie eine gute Idee oder wertvolles Feedback für Elektor? Melden Sie sich bei uns unter redaktion@elektor.de. Wir sind gespannt auf Ihre Meinung!



ESP32 und ChatGPT

Elektor Gast-Ausgabe 2023, S. 16 (230485)

Das Projekt „ESP32 und ChatGPT“ aus der Dezember-Ausgabe hat mich angesprochen, so dass ich es gerne ausprobieren möchte. Die Hardware ist bestellt, so dass ich loslegen kann. Leider scheitere ich schon jetzt daran, die C-Software für den ESP32-1 zum Laufen zu bringen. Keine der verwendeten Bibliotheken kann in der Arduino-IDE installiert werden. Die Datei *WiFi.h* habe ich nach einigem Suchen gefunden und manuell installiert. Leider bin ich mit der Datei *HTTPClient.h* gescheitert.

Können Sie mir hier bitte weiterhelfen; vielleicht die Beschreibung auf GitHub erweitern oder die benötigten Bibliotheken zur Verfügung stellen? Ich würde gerne meine Zeit damit verbringen und nicht damit, die Grundlagen zum Laufen zu bringen... Vielen Dank im Voraus.
Andreas Petereit (Deutschland)

Ich empfehle Ihnen, mit einer frischen, brandneuen Installation der Arduino-IDE 2.2.1 zu beginnen. Wenn Sie einige Bibliotheken manuell installiert haben und diese nicht funktionieren, sollten Sie sie deinstallieren, um von einem „sicher funktionierenden“ Ausgangspunkt zu starten. Siehe die Anweisungen unter [1].

Im Falle einer Neuinstallation, wenn Sie eines der beiden Nano-ESP32-Boards an den Computer anschließen, erhalten Sie ein Popup-Fenster mit der Frage, ob Sie den *Arduino ESP32 Boards core* installieren möchten. Klicken Sie auf Ja. Andernfalls können Sie überprüfen, ob dieses Paket installiert ist, indem Sie den Boards-Manager öffnen und nach „ESP32“ suchen. Wenn es nicht installiert ist, müssen Sie es installieren. Als Teil dieser Installation erhalten Sie automatisch die Bibliotheken *Wifi.h* und *HTTPClient.h*. Andererseits muss die Bibliothek *ArduinoJson.h* installiert werden. Klicken Sie auf Sketch → Bibliothek einbinden → Bibliotheken verwalten... und suchen Sie im Bibliotheksmanager nach „ArduinoJson“.

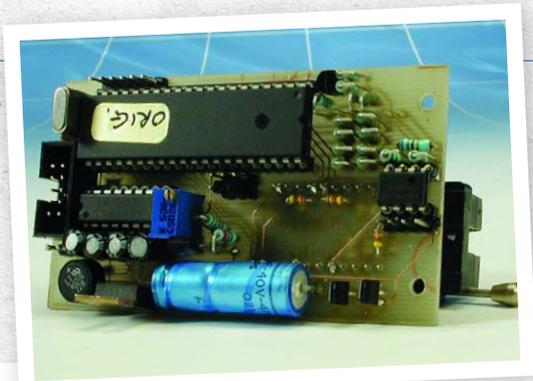
Nun sollten Sie keine Kompilierungsfehler mehr erhalten. Sie müssen die .INO-Datei später bearbeiten und

neu kompilieren, weil Sie die WLAN-Zugangsdaten in die Zeilen 29...30 und den API-Schlüssel für OpenAI (Zeile 32), den Sie vielleicht noch nicht erstellt haben, eingeben müssen. Sie müssen auch die IP-Adresse des anderen Nano-ESP32-Boards (auf dem MicroPython läuft) eingeben, die Sie vielleicht noch nicht kennen. Folgen Sie dazu den Schritten zur MicroPython-Installation im Artikel und bearbeiten Sie die Datei *ESP32xESP32_2.py*, die Sie auch im GitHub-Repository finden, um die WLAN-Anmeldedaten in den Code einzufügen. Dann können Sie das Nano-ESP32-2-Board einschalten, nachsehen, welche IP es vom Router erhält, und schließlich den Code in der Datei *NanoESP32-1.INO* entsprechend bearbeiten.

Sie müssen auch etwas in Zeile 140 der .INO-Datei ändern. Der Code funktionierte zum Zeitpunkt des Schreibens und der Veröffentlichung, aber OpenAI hat seine API geändert und die Benutzer darüber informiert, dass ab dem 4. Januar 2024 das Modell *text-davinci-003* nicht mehr verwendet werden kann. Ändern Sie also bitte `text-davinci-003\` in Zeile 140 in `gpt-3.5-turbo-instruct\`. Bitte beachten Sie auch, dass Sie, damit diese Demo funktioniert und Sie die OpenAI-API vom Arduino-NanoESP32-1 aus aufrufen können (wie es im Artikel vorgeschlagen wird), „free credits“ auf Ihrem OpenAI-Konto haben müssen. Wenn Sie ein neues Konto erstellen, erhalten Sie kostenlose Credits im Wert von 5 \$, die jedoch nach ein paar Monaten verfallen. Denken Sie also daran, wenn Sie als Antwort auf die ChatGPT-Abfragen vom NanoESP32-1 die Meldung „Error 429 Rate limit reached for requests“ erhalten.

Abschließend möchte ich anmerken, dass dieser Artikel meiner Meinung nach eher dazu diente, Beispiele für die Kommunikation zwischen zwei Mikrocontroller-Boards zu zeigen und ein Beispiel für den Zugriff eines Mikrocontrollers auf eine Online-KI über eine API vorzustellen, als eine schlüsselfertige Lösung zu bieten. Ich empfehle Ihnen dringend, selbst auch andere Ansätze auszuprobieren!

Jean-François Simon (Elektor)



PIC-Prog, ein universeller PIC-Programmer

Elektor 09/2003, S. 14 (010102)

Wo kann ich den programmierten PIC (Bestellnummer 010202-41) bekommen? Er wird in der Ausgabe vom September 2003 erwähnt, in der der universelle PIC-Programmer vorgestellt wird. Ich würde gerne einen bauen. Können Sie mir auch sagen, welches Kabel ich für den Anschluss an meinen PC benötige, da die Ausgänge USB sind? Ich danke Ihnen im Voraus.

X. R. (Frankreich)

Wir verkaufen keine programmierten Mikrocontroller mehr; wir versuchen jedoch, unseren Abonnenten, wenn immer möglich, Programme zum Herunterladen zur Verfügung zu stellen. In diesem Fall sind das PC-Programm und die Mikrocontroller-Firmware im HEX-Format in der ZIP-Datei auf der Seite [7] verfügbar. Obwohl ich mich für Ihr Interesse an unseren Projekten bedanke, möchte ich Ihnen dennoch davon abraten, dieses Programmiergerät nachzubauen. Es ist veraltet und kann nur eine begrenzte Anzahl von älteren PICs programmieren. Die dazugehörige Software ist ebenfalls veraltet, und es gibt keine Garantie, dass sie auf einer neueren Windows-Version reibungslos läuft. Sie benötigen einen PC mit einer seriellen Schnittstelle oder einen USB-RS232-Konverter. Schließlich basiert dieses PIC-Programmiergerät auf einem PIC, den Sie mit einem anderen Programmiergerät programmieren müssten!

Stattdessen würde ich Ihnen empfehlen, ein gebrauchsfertiges Programmiergerät zu verwenden, zum Beispiel PicKit 3 (auch schon ein paar Jahre alt, aber immer noch relevant), PicKit 4, PicKit 5 oder MPLAB Snap. PicKit 3 wird von Microchip nicht mehr verkauft, aber billige Klone aus China funktionieren gut. Der Vorteil ist, dass es eine „PicKit3 Standalone-Software“ gibt, mit der man das HEX-File, das das zu programmierende PIC-Programm enthält, ausführen kann, ohne das ziemlich sperrige MPLAB X installieren zu müssen. Um PicKit 4 oder höher zu verwenden, führt aber kein Weg an MPLAB X vorbei. Sie können den PIC in ein Breadboard stecken und die Verbindungen mit Jumperdrähten herstellen oder einen Adapter verwenden (suchen Sie bei Google nach „ICD2 ZIF“).

Jean-François Simon (Elektor)



Energiespeicherung heute und morgen

Elektor 01-02/2024, S. 32 (230636-02)

Welchen Energievorteil haben prismatische Li-Ionen-Akkus (Blockbatterien) gegenüber zu einem Akkupack verschweißten 18650-Einzelzellen? Herzlichen Dank!
Hans-Rüdiger Funk (Deutschland)

Prismatische Zellen haben einen Vorteil in Bezug auf den Faktor Volumen/Kapazität. Allerdings sind sie schwieriger zu kühlen oder zu erwärmen, da es keine Zwischenräume gibt. Aus dem letztgenannten Grund werden in Autos runde Zellen verwendet.

Thomas Scherer (Elektor)



Optimierung von Balkonkraftwerken

Elektor 01-02/2024, S. 10 (230660-02)

Mir ist aufgefallen, dass OpenDTU-Derivate wie OpenDTU onBattery nicht erwähnt werden. Dies ist eine sehr interessante Lösung, die eine Null-Einspeisung, aber auch den Betrieb einer Batterie ermöglicht. Das Projekt ist bereits ab April 2023 verfügbar. Hier gibt es viel Potenzial, um die im Artikel beschriebenen Probleme zu lösen. Sowohl die Nulleinspeisung als auch die konstante Einspeisung in der Nacht sollte mit zugegebenermaßen etwas mehr Aufwand möglich sein. Die Energiepreise sind bereits wieder im Steigen begriffen. Das Projekt ist unter [4] zu finden, das Wiki unter [5].

Joachim Nolte (Deutschland)

Herzlichen Dank für die Anregung!
Thomas Scherer (Autor des Artikels)



Eisenloser Kopfhörerverstärker mit 4 x EL504

Elektor Schaltungs-Sonderheft, Elektor Januar 2020 [6]

Ich möchte gerne den Wert der Eingangskondensatoren für die Kopfhörerverstärkerschaltung mit vier EL504-Röhren auf Seite 92 des Sonderhefts wissen. Ich danke Ihnen!

Helmut Liebetrau (Deutschland)

Vielen Dank für Ihre E-Mail. Der Wert ist nicht kritisch; man sieht in dieser Art von Aufbau oft Werte für die Eingangskondensatoren im Bereich von 1 μ F bis 10 μ F. Wenn Sie genauer rechnen wollen, müssen Sie sich das Hochpassfilter ansehen, der aus dem betreffenden Kondensator und dem Eingangswiderstand, in diesem Fall 10 k Ω , besteht. Mit der klassischen Formel $f = 1/(2 \times \pi \times R \times C)$ für ein Filter erster Ordnung können Sie einen 1- μ F-Kondensator verwenden, der alle Frequenzen über etwa 16 Hz durchlässt, oder einen 2,2- μ F-Kondensator, den Signale ab etwa 7 Hz passieren. Ich empfehle Kondensatoren vom Typ MKP4 oder MKS4, 250 V oder 400 V.

Jean-François Simon (Elektor)



TimeClick - Programmierbare Kamerasteuerung

Elektor 02/2011, S. 14 (100371)

Hallo, ich würde gerne die TimeClick-Schaltung nachbauen, für zwei digitale Canon-Kameras. Ich denke, der programmierte Mikrocontroller 100371-41 ist alt und wurde von Elektor abgekündigt. Außerdem scheint der ATtiny861-20SU nicht mehr unter dieser Nummer erhältlich zu sein. Gibt es einen anderen Chip für diese Schaltung mit den gleichen Funktionen? Ich freue mich auf Ihre Nachricht.

Dick van den Berg (Niederlande)

Es stimmt, dass wir keine programmierten Mikrocontroller mehr verkaufen, aber der ATtiny861 ist immer noch bei Digikey, Mouser und so weiter erhältlich. Sie können ihn selbst programmieren, wenn Sie wollen. Der Code ist verfügbar unter [2]. Laut der Device-Support-Liste bei Microchip [3] sind die Programmierer ICD5, PICKIT5, ICE4, PICKIT4, SNAP, Atmel Embedded Debugger EDBG, mini EDBG, nano EDBG, Atmel-ICE, Atmel-ICE Power Debugger mit dem ATtiny861 kompatibel. Viel Erfolg!

Jean-François Simon (Elektor)



RG – 240144-02

WEBLINKS

[1] Deinstallation von Arduino-Bibliotheken: <https://t1p.de/p4q8x>

[2] TimeClick Projekt-Software: <https://www.elektormagazine.de/magazine/elektor-201102/19542>

[3] Microchip Device-Support-Liste: <https://t1p.de/grbvj>

[4] OpenDTU OnBattery: <https://t1p.de/5br5j>

[5] Wiki OpenDTU OnBattery: <https://t1p.de/dcf50>

[6] Elektor Schaltungs-Sonderheft (Elektor, 2020): <https://www.elektor.de/products/elektor-schaltungs-sonderheft-2020>

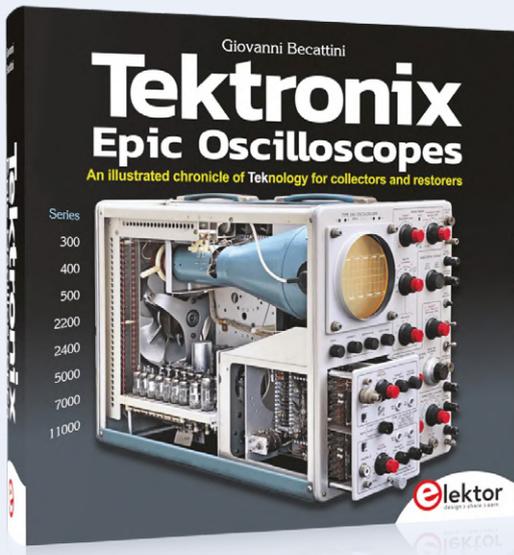
[7] PICProg-Software: <https://www.elektormagazine.com/magazine/elektor-200309/17563>

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).



Tektronix Epic Oscilloscopes

Eine illustrierte Chronik der *Tek*nologie für Sammler und Restauratoren

Oszilloskope haben einen wichtigen Beitrag zum Fortschritt des menschlichen Wissens geleistet, nicht nur in der Elektronik, sondern in allen Wissenschaften, wo immer eine physikalische Größe in ein zeitbezogenes elektrisches Signal umgewandelt werden kann. Dieses Buch zeichnet die Geschichte eines wichtigen Instruments anhand vieler Tektronix-Produkte nach.

Preis: 69,95 €

Mitgliederpreis: 62,96 €

www.elektor.de/20749

Miniware TS1C Kabellose Lötstation



Die Miniware Cordless Soldering Station TS1C (mit integriertem OLED-Bildschirm und Bluetooth) ist ein intelligentes Lötwerkzeug, das in weniger als 20 Sekunden auf bis zu 400°C erhitzt. Dank des eingebauten Akkus liegt der kabellose Lötstift gut in der Hand und lässt sich bequem bedienen.

Preis: 169,95 €

Mitgliederpreis: 152,96 €

www.elektor.de/20777



Dragino LoRa/LoRaWAN IoT Kit v3

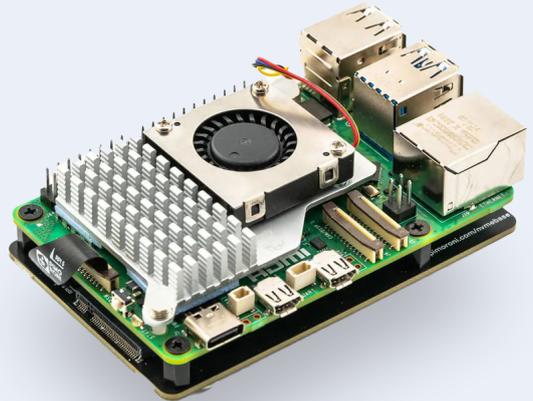


Preis: 249,00 €

Mitgliederpreis: 224,10 €

www.elektor.de/20775

Pimoroni NVMe Base für Raspberry Pi 5 (500 GB SSD)



Preis: 84,95 €

Mitgliederpreis: 76,46 €

www.elektor.de/20796

Quick 861DW Heißluft-Rework-Station (1000 W)



Preis: 349,00 €

Mitgliederpreis: 314,10 €

www.elektor.de/20787

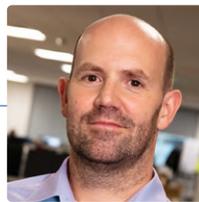
FNIRSI SG-003A Signalgenerator



Preis: ~~89,95 €~~

Sonderpreis: 74,95 €

www.elektor.de/20774

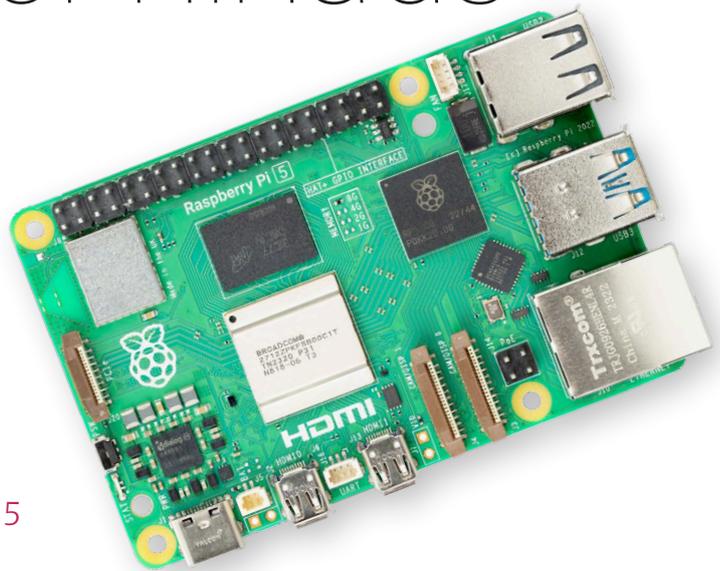


Quelle: Raspberry Pi

Der Raspberry Pi 5 und darüber hinaus

Fragen von Jean-François Simon (Elektor)

Es ist nun einige Monate her, dass der Raspberry Pi 5 veröffentlicht wurde, und wir hatten das Glück, Eben Upton, dem kultigen Geschäftsführer von Raspberry Pi und Mitbegründer der Stiftung, einige Fragen zu stellen und wichtige Aspekte der Entwicklung und der Auswirkungen des Raspberry Pi 5 zu besprechen. Zu den Themen gehören auch das umfassende, kompromisslose Computererlebnis des neuesten Modells, die Entwicklung der Programmiersprachen, die Integration und die Zukunft von KI in Raspberry-Pi-Produkten, die Aussichten für den Mikrocontroller RP2040 und vieles mehr.



J.F. Simon: Der Raspberry Pi 5 ist jetzt seit ein paar Monaten auf dem Markt. Wie läuft der Verkauf?

Eben Upton: Sehr gut. Wir stehen kurz davor, unsere millionste Einheit auszuliefern. Das geht ein wenig langsamer als beim Raspberry Pi 4 und war bis vor kurzem durch die Produktion begrenzt. Ein großes Lob an das Team von Sony, das uns auf eine Produktionsrate von 90.000 Stück pro Woche gebracht hat. (Anmerkung der Redaktion: Das Sony UK Technology Centre in Pencoed, Wales, stellt die Raspberry Pi-Platinen her.) Das wird nicht ewig so weiterlaufen müssen, aber es gibt uns die Möglichkeit, mit der Nachfrage Schritt zu halten und einen kleinen Bestand aufzubauen.

JF: Haben Sie aufregende Projekte mit dem Raspberry Pi 5 gesehen, die mit früheren Versionen schwieriger zu realisieren gewesen wären, und die Sie besonders stolz auf die Veröffentlichung gemacht haben?

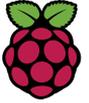
Eben: Ich glaube, das Aufregendste am Raspberry

Pi 5 ist für mich, dass wir endlich das kompromisslose Desktop-PC-Erlebnis geschaffen haben, das wir seit der Einführung des allerersten Raspberry Pi im Jahr 2012 anstreben. Man sieht, wie Menschen (meine Tochter eingeschlossen) den Raspberry Pi 5 als ihren „Alltags-Computer“ nutzen, ohne sich dadurch eingeschränkt zu fühlen.

Durch den neuen, für den User offenen Single-Lane-PCIe-Anschluss eröffnen sich zusätzliche Möglichkeiten zum Experimentieren. Wir beobachten mit Interesse, wie Jeff Geerling versucht, seine riesige Sammlung von PC-Grafikkarten mit dem Raspberry Pi 5 zum Laufen zu bringen.

JF: Haben Sie interessante oder lustige Anekdoten über Dinge, die während der Entwicklung des Raspberry Pi 5 passiert sind und die Sie jetzt, wo er auf dem Markt ist, vielleicht erzählen können?

Eben: Was die Leute dem Raspberry Pi 5 nicht ansehen, ist, wie lange die Entwicklung gedauert hat. Die ersten Mitglieder des ASIC-Teams begannen im Sommer 2015 mit der Arbeit am RP1, damals noch unter dem Namen *Project X*. (Anmerkung der Redaktion: Der RP1 ist eine von Raspberry Pi selbst entwickelte Southbridge, die den Großteil der I/O-Funktionen des Raspberry Pi 5 bereitstellt.) Das war also ein achtjähriges Programm, das bei einem Unternehmen begann,



das zu diesem Zeitpunkt noch keine drei Jahre alt war! Einer der Gründe, warum es Spaß macht, bei Raspberry Pi zu arbeiten, ist, dass wir diese wirklich langfristigen Wetten eingehen können und sehen, wie sie sich auszahlen.

JF: In den frühen 2010er Jahren, als Sie am ersten Raspberry Pi arbeiteten, war eines der Hauptziele, das Erlernen der Informatik zu fördern, die Leute dazu zu bringen, die Ärmel hochzukrempeln und zu programmieren und zu verstehen, wie es funktioniert. Heute gibt es Tools wie ChatGPT, die Code für einen generieren können, der meistens funktioniert, wenn man sie etwas anleitet. Glauben Sie, dass diese Art von Tools die Menschen immer denkfauler werden lässt? Was halten Sie von diesen Werkzeugen?

Eben: Ich bin mir nicht sicher, ob ich zustimme, dass ChatGPT derzeit selbst mit „etwas Anleitung“ Code in Produktionsqualität erzeugen kann. Aber auf jeden Fall glaube ich nicht, dass solche Tools die Leute faul machen oder ihnen die Arbeit wegnehmen: Wir haben seit Beginn des Computerzeitalters in den 1940er Jahren Werkzeuge (Assembler, Compiler, höhere Programmiersprachen) entwickelt, die die Produktivität erhöht haben, und sie haben meist den Effekt, dass die Nachfrage nach Programmierern steigt (siehe Jevons Paradox)! Wenn man ChatGPT vorsichtig bittet, einem etwas Python zu schreiben, spricht man von „Computerprogrammierung“: Es handelt sich lediglich um die Programmierung in einer anderen - und leider weniger präzisen - Sprache.

JF: In den 1980er Jahren haben viele junge Enthusiasten ihre ersten Schritte in der Programmierung mit BASIC auf Systemen wie dem BBC Micro gemacht. Heute setzt der Raspberry Pi auf Python als Einstiegsprache für Anfänger. Wie wirkt sich diese Verschiebung bei den Ausgangssprachen Ihrer Meinung nach auf die Lernerfahrung und die Herangehensweise der jungen Programmierer von heute aus?

Eben: Ich denke, dass es für junge Programmierer sehr motivierend ist, eine Sprache zu erlernen, die die niedrige Einstiegshürde von BASIC mit der hohen Hürde einer „richtigen“ Programmiersprache verbindet. Wenn man jemanden bittet, den Computer oder die Sprache zu wechseln, besteht immer die Möglichkeit, dass er einfach „nein“ sagt und aufhört. Es ist also sehr wertvoll, Studenten mit Python vertraut zu machen, einer sehr anfängerfreundlichen Sprache, und ihnen zu vermitteln, dass sie „Hallo Welt“ in der gleichen Sprache schreiben, die professionelle Ingenieure für die Entwicklung von Unternehmenssoftware verwenden.

JF: Sie haben in der Vergangenheit erwähnt, dass es schwierig war, Hardware-basierte KI in Raspberry-Produkte zu integrieren, weil dies teuer ist und die Nutzer, die sie nicht brauchen, zugunsten eines bestimmten

Prozentsatzes von Leuten, die sie vielleicht nutzen werden, benachteiligt werden. Wie auch immer, KI benötigt oft leistungsstarke GPUs, um interessante Dinge zu ermöglichen, was auf einem Raspberry Pi nicht praktikabel ist. Könnten Sie Ihre Gedanken über KI teilen und wie KI und Raspberry-Pi-Produkte gut zusammenarbeiten können?

Eben: Wenn Sie meinen Vorschlag akzeptieren, dass wir gute Arbeit für KI-Workloads leisten wollen, aber Benutzer, die nicht auf KI spezialisiert sind, nicht mit dedizierter Beschleunigungshardware belasten können, gibt es meiner Meinung nach zwei natürliche Konsequenzen für das Systemdesign: Wir fügen eine Menge CPU-Leistung hinzu, so dass niedrige bis mittlere Inferenz-Workloads auf der CPU ausgeführt werden können (wir bieten dies mit unseren Quad-2,4-GHz-A76s auf dem Raspberry Pi 5 und unseren Dual-133-MHz-M0+s auf dem RP2040 für TinyML), und schnelle Schnittstellen, um mit Beschleunigern für High-End-Workloads zu kommunizieren (USB 3 auf Raspberry Pi 4 und 5, PCIe auf Raspberry Pi 5).

JF: Kurz nach der Markteinführung des Raspberry Pi 5 wurden viele Presseartikel über die Unterschiede zwischen dem 4er und dem 5er veröffentlicht. Was ist für Sie persönlich die wichtigste neue Funktion?

Eben: Ehrlich gesagt, die Leistung. Wie gesagt, es ist der erste Raspberry Pi, vor dem ich mich hinsetze und vergesse, dass ich keinen richtigen Intel-PC benutze.

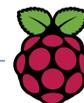
JF: Nachdem Bloomberg die Nachricht über den möglichen Börsengang und den Verkauf von Raspberry-Pi-Aktien an Investoren verbreitet hat, haben einige Bastler und Maker ihre Bedenken auf Reddit, X (früher Twitter) und so weiter geäußert. Werden Sie in der Lage sein, Ihren Community-orientierten Ethos angesichts des Drucks, der mit einem börsennotierten Unternehmen einhergeht, beizubehalten?

Eben: Es ist noch zu früh, um die Möglichkeit eines Börsengangs zu prüfen, aber ich bin mir sicher, dass wir das könnten. Sie müssen bedenken, dass wir bereits einen hohen Anreiz haben, großartige, kostengünstige Produkte herzustellen (weil wir Freaks sind und die Produkte selbst herstellen möchten, die wir sonst kaufen müssten) und Geld zu verdienen (weil die Gewinne aus dem Handel die Stiftung finanzieren, die uns sehr am Herzen liegt). Unsere Motivation würde



Elektor traf sich im September 2023 mit Eben in Cambridge (Großbritannien). Erfahren Sie alles, was Eben in diesem Interview zu sagen hatte.
https://youtu.be/YkXCuW_gf2M





sich also nach dem Börsengang nicht ändern, und ich wüsste nicht, warum sich unser Verhalten ändern sollte.

Letztlich gilt jedoch: Probieren geht über Studieren. Kommen Sie in fünf Jahren wieder, um zu sehen, wie wir vorankommen.

JF: Themenwechsel: Der RP2040 ist jetzt drei Jahre alt. Gibt es Pläne, Ihr Mikrocontroller-Sortiment in nächster Zeit mit anderen Produkten zu erweitern?

Eben: Ich denke, wir wissen, was die Leute am RP2040 schätzen: die vergleichsweise hohe Integer-Leistung, den großen Speicher und die flexible I/O. Und wir wissen auch, wo die Schwächen liegen: vergleichsweise hoher Standby-Strom, fehlende Fließkomma- und DSP-Unterstützung und das Fehlen eines Sicherheitsmodells und nichtflüchtiger On-Chip-Speicher. Es gibt also ziemlich genaue Vorgaben für einen Nachfolger, und wir werden uns sehr genau ansehen, wie wir dieses Gerät anbieten können.

JF: Wird es nach dem Erfolg des Raspberry Pi 400 auch einen Raspberry Pi 500 geben, der auf der Hardware des Raspberry Pi 5 basiert?

Eben: Es gibt noch nichts anzukündigen, aber der Raspberry Pi 400 war ein großer Erfolg für uns, und wir würden gerne die Leistung des Raspberry Pi 5 auf diesen Formfaktor bringen.

JF: Ich habe gehört, dass es in Cambridge und Leeds offizielle Raspberry-Pi-Geschäfte gibt. Das ist großartig! Könnten Sie uns mehr darüber erzählen, wie sie laufen und wer die Hauptkunden sind? Ich bin mir sicher, dass diese Läden großartig sind, um neue Kunden anzusprechen, aber sehen Sie auch Leute, die dort hingehen und größere Mengen an Produkten für ihren professionellen Bedarf kaufen? Haben Sie Pläne, weitere dieser Läden zu eröffnen?

Eben: Der Laden in Cambridge war im Jahr 2023 solide profitabel, und auch unsere kurzzeitigen Pop-up-Stores machen ein sehr gutes Geschäft. Leeds macht derzeit Verluste, aber wir wissen, dass es Zeit braucht, um einen Kundenstamm aufzubauen, und wir können es uns leisten, geduldig zu sein. Ich glaube nicht, dass wir Läden in der Größenordnung von Apple eröffnen werden, aber man könnte eine allmähliche Expansion sehen, bei der ein neuer Laden eröffnet wird, sobald der vorherige Laden die Rentabilität erreicht. Wahrscheinlich erst einmal in Großbritannien, aber längerfristig, wer weiß?

JF: Vielen Dank für Ihre Zeit und für dieses Interview. Ich bin sicher, dass es für unsere Leser von großem Interesse sein wird. Wir wünschen Ihnen viel Erfolg bei Raspberry Pi für das Jahr 2024 und darüber hinaus.

Eben: Ich danke Ihnen! ◀

Haben Sie Fragen oder Kommentare?

Haben Sie technische Fragen oder Kommentare zu diesem Artikel? Wenden Sie sich bitte an den Autor unter jean-francois.simon@elektor.com oder an die Elektor-Redaktion unter redaktion@elektor.de.

Über Eben Upton

Eben Upton ist der Geschäftsführer von Raspberry Pi (Trading) Ltd. und Mitbegründer der Raspberry Pi Foundation. Seit seiner Kindheit begeistert er sich für Computer. Nach seinen Abschlüssen in Physik und Ingenieurwesen, Informatik und Management der Universität Cambridge hatte er eine abwechslungsreiche Karriere. Er war unter anderem Technischer Direktor bei Broadcom, veröffentlichte akademische Arbeiten über Computertechnologien und gründete zwei Softwareunternehmen. Und natürlich leitet er das Unternehmen Raspberry Pi, wo er unter anderem die Hard- und Softwarearchitektur des Raspberry-Pi-Computers beaufsichtigt. Er erhielt mehrere Auszeichnungen für seine Beiträge zu Wirtschaft und Bildung. Unter seiner Leitung wurde die Produktion des Raspberry Pi von China nach Pencoed (Wales), in das Sony UK Technology Centre verlegt, nicht weit von seiner Heimatstadt entfernt.



Über Jean-François Simon

Jean-François Simon hat eine langjährige Leidenschaft für Elektronik und beschäftigt sich mit so unterschiedlichen Themen wie Schaltungsdesign, Testen und Messen, Prototyping, spielt mit SDRs und mehr. Er liebt es, seine Werkzeuge und andere Systeme zu entwickeln, zu modifizieren und zu verbessern. Er hat einen Ingenieurshintergrund und hat auch Spaß an Mechanik, (maschinelle) Bearbeitung und allen technischen Dingen. Jean-François ist seit kurzem Mitglied der Elektor-Redaktion.



Passende Produkte

- ▶ **Raspberry Pi 5 (8 GB RAM)**
www.elektor.de/20599
- ▶ **Raspberry Pi 5 (4 GB RAM)**
www.elektor.de/20598
- ▶ **Raspberry Pi Pico RP2040**
www.elektor.de/19562

SG – 240145-02

Treten Sie jetzt der Elektor Community bei!



Jetzt



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
Mitgliedschaft!



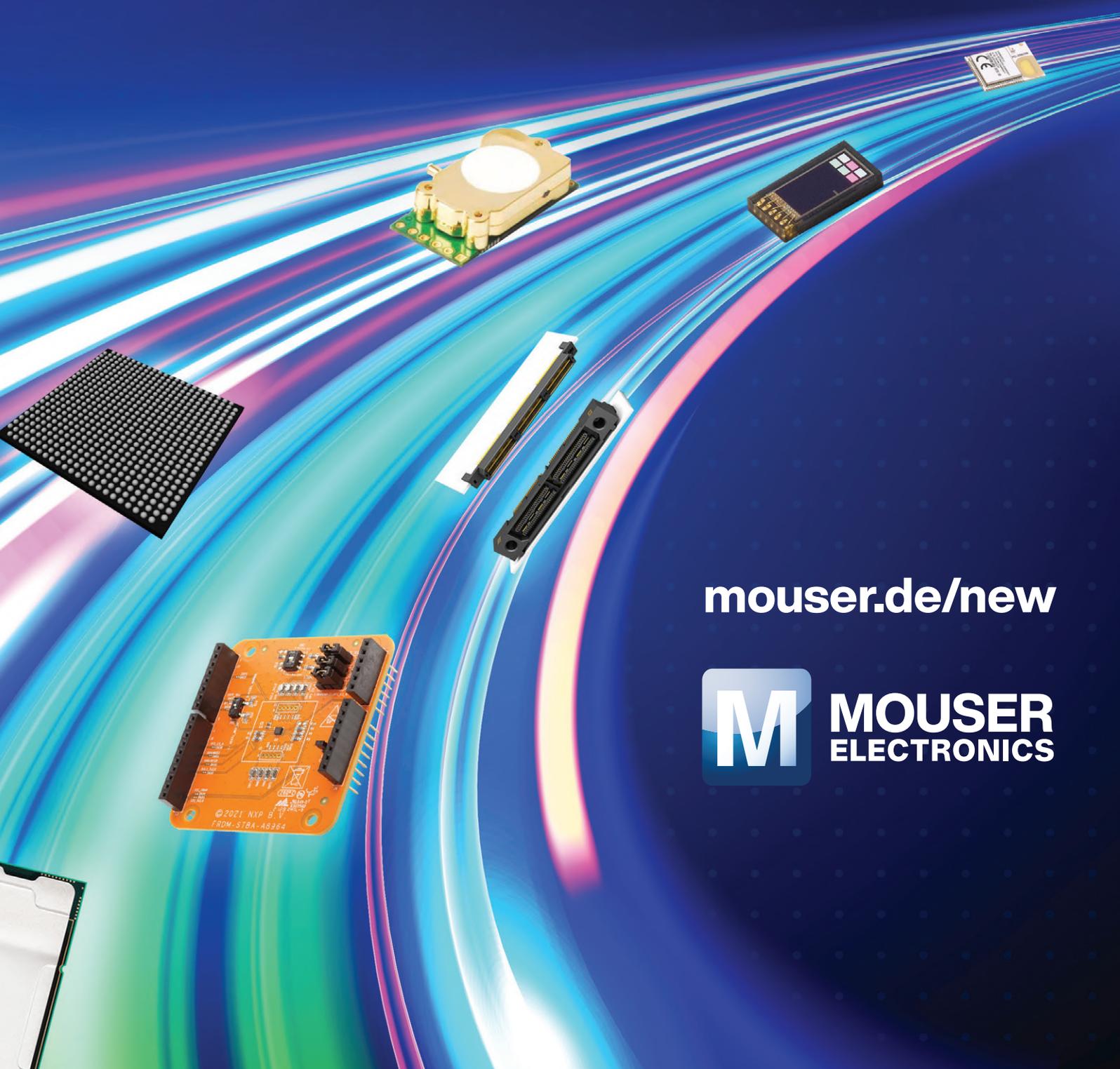
- ✓ Zugang zum kompletten Online-Archiv
- ✓ 8x Elektor Magazin (PDF)
- ✓ 10% Rabatt im Elektor Store und exklusive Angebote
- ✓ Zugriff auf über 5.000 Gerber-Dateien u.v.m. aus der Projektplattform Elektor Labs



www.elektormagazine.de/Abonnement

Volle Kraft voraus

Vertrauen Sie dem führenden Unternehmen für Neuprodukteinführungen™, um Ihre Idee in Rekordgeschwindigkeit umzusetzen



[mouser.de/new](https://www.mouser.de/new)



**MOUSER
ELECTRONICS**