€ 14,95

elektor MAG
design > share > earn

683
* SINDS 1961 *
NOVEMBER/DECEMBER 2023
ELEKTORMAGAZINE.NL

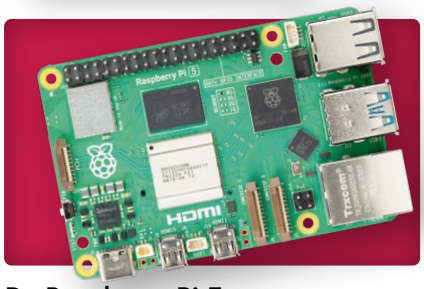
Google Bard en Flux Copilot aan de tand gevoeld

AI in het elektronicalab

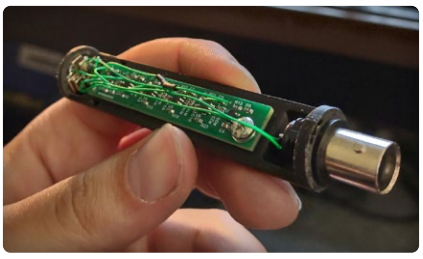
FOCUS ON
Prototyping & Production

Printen in geringe aantallen produceren
met en zonder assemblage

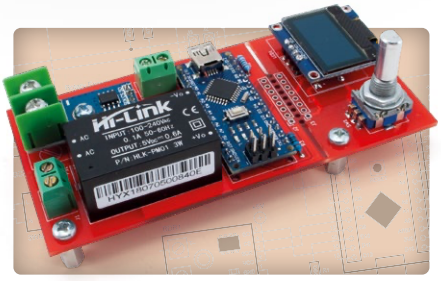
Eerst proberen, dan solderen
gratis simulatie- en 3D-ontwerptools



De Raspberry Pi 5
veel beter dan zijn voorganger p. 6



MEMS-microfoon
uitstekende prestaties voor weinig geld p. 70

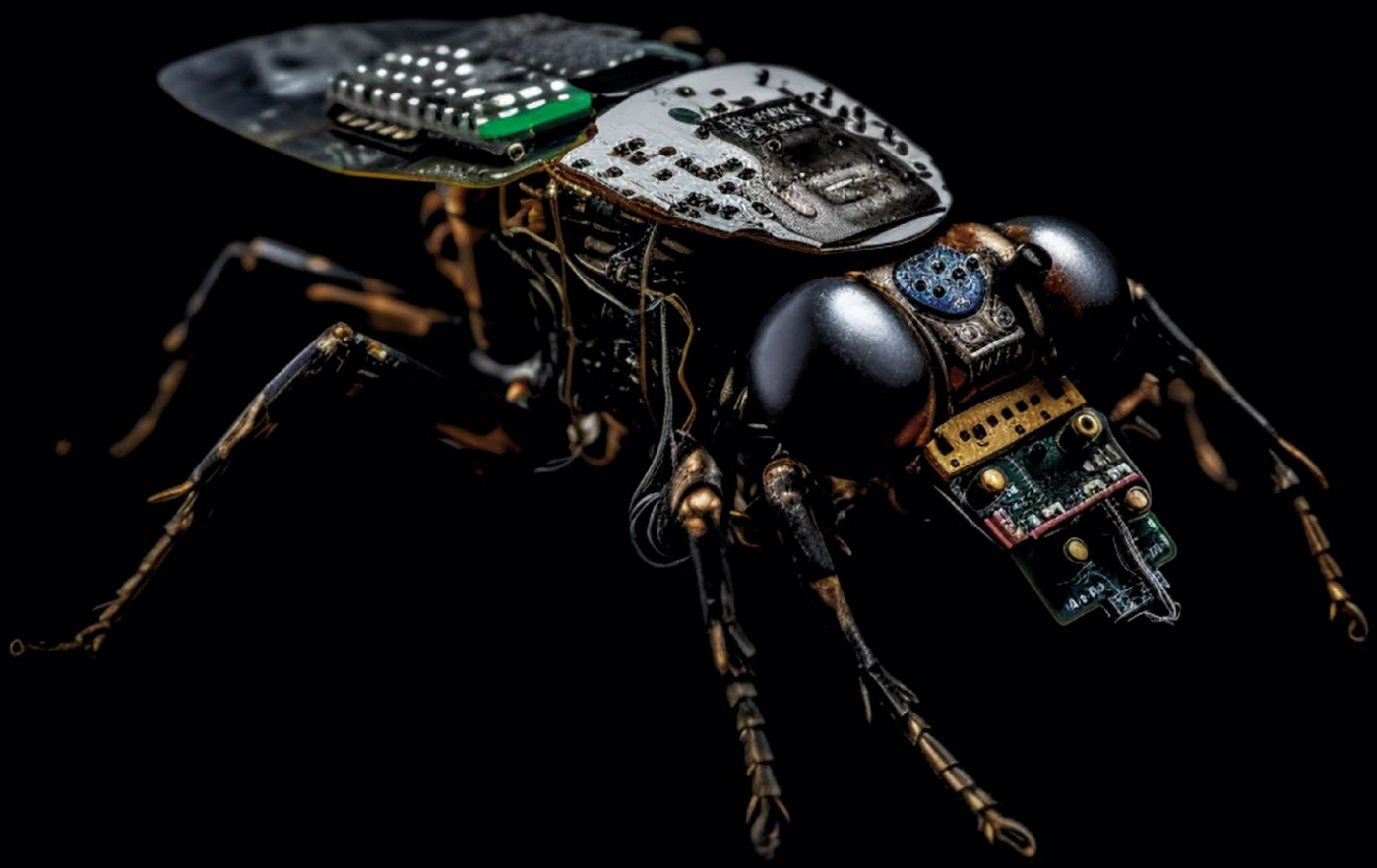


DHZ-reflowplaat
voor assemblage of reparatie van kleine SMD-schakelingen p. 120

8 710966 982907 00683

Innovators hebben al eeuwen over de mogelijkheden van AI nagedacht. Nu is de tijd gekomen om te zien waar de technologie toe in staat is.

DEBUGGEN MAKKELIJK GEMAAKT



Ontdek, configureer, ontwikkel, debug, kwalificeer en ga snel de markt op met behulp van Microchip's ontwikkeltools voor PIC®, AVR® en SAM microcontrollers, SAM microprocessoren en dsPIC® digital signal controllers. We hebben onze complete lijn van embedded software-ontwikkeltools geïntegreerd met onze embedded hardware-ontwikkeltools, zodat u gebruik kunt maken van alle mogelijkheden van het MPLAB® ontwikkel-ecosysteem voor een ongeëvenaarde ervaring.

PICkit™ 5

De MPLAB® PICkit 5 in-circuit debugger/ programmer is een krachtig hulpmiddel dat snelle prototyping en productieklare programmering biedt voor alle Microchip apparaten. Dit veelzijdige apparaat is uitgerust met een reeks functies die het de perfecte metgezel maken voor uw programmeerbehoeften.

www.microchip.com/pickit5

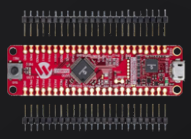
MPLAB® ICD 5

De MPLAB ICD 5 bouwt voort op de sterke punten van onze mid-range debugger en biedt instrumented trace (ARM SWO) mogelijkheden. Met ondersteuning voor alle PIC®, dsPIC®, SAM, en AVR® IC's, biedt ons nieuwste product uitgebreide ondersteuning voor een breed scala aan apparaten.

www.microchip.com/icd5

Compatibel met deze en vele andere boards:

PIC32MK MCA
Curiosity Pro
Development
Board



SAM D21
Curiosity Nano
Evaluation Kit

AM E54
Curiosity Ultra
Development Board

PIC32CM JH01
Curiosity Pro
Development
Board

PIC16F15244
Curiosity Nano
Evaluation Kit

EV72Y42A - AVR64DD32
Curiosity Nano
Evaluation Kit

PIC32CX SG61
Curiosity Ultra
Evaluation Board

PIC32CM MC00
Curiosity Pro
Evaluation Kit

Meer info: www.microchip.com/mplab

IN DIT NUMMER

63e jaargang – nr. 683
november/december 2023

AI in het elektronicalab
Google Bard en Flux Copilot aan de tand gevoeld

10

Arduino-golfvormgenerator
Nano + code = functiegenerator

20

Rubrieken

5 Colophon

110 Elektor infographic
prototyping en productie

116 Alle begin...
...versterkt verschillen

130 2023: een AI-oyssee
hulp bij het ontwerp van een tastbaar project

134 Ethiek in elektronica
Brussel innoveert

138 Hexadoku
puzzelen voor elektronici

Achtergrond en info

6 De Raspberry Pi 5
veel beter dan zijn voorganger

10 AI in het elektronicalab
ontwerpen, componenten zoeken en programmeren

34 Een eenvoudige behuizing CNC'en
met Autodesk Fusion 360 voor persoonlijk gebruik

40 Printen in geringe aantallen produceren
met en zonder assemblage

46 IoT-simulatie vereenvoudigd met Wokwi
ontwikkelaar Uri Shaked over ontwerp, software en meer

54 Een gids voor puristisch programmeren
deel 3: CMSIS-headers, automatisch testen en een webserver

127 Begin niet met een prototype – begin met een pretotype!
kijk of er een markt is voor je product

Projecten

20 Arduino Nano-golfvormgenerator
Nano + code = functiegenerator

28 Kerstslinger op zonne-energie
milieuvriendelijke oplossing voor op het balkon

32 USB-Killer-detector
voorkomen is beter

64 LoRa, een Zwitsers zakmes
deel 2: de hard- en software

70 MEMS-microfoon: ontwerp en constructie

120 Mini-reflowplaat
voor assemblage of reparatie van kleine SMD-schakelingen

COLOFON

63e jaargang nr. 683 – ISSN 2590-0765
november/december 2023

Elektor verschijnt acht keer per jaar en is een uitgave van **Elektor International Media B.V.**
Postbus 11, 6114 ZG Susteren (Nederland)
Tel.: +31 (0)46 4389444
www.elektor.nl | www.elektormagazine.nl

Voor al uw vragen: service@elektor.nl

Lid worden: www.elektormagazine.nl/abo

Advertenties: Raoul Morreau
Tel. +31 (0)6 4403 9907
raoul.morreau@elektor.com
www.elektormagazine.nl/adverteren

Auteursrecht
© Elektor International Media B.V. - 2023

Niets uit deze uitgave mag verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt worden door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De auteursrechtelijke bescherming van Elektor strekt zich mede uit tot de illustraties met inbegrip van de printed circuits, evenals de ontwerpen daarvoor. In verband met artikel 30 van de Rijksoctrooiwet mogen de in Elektor opgenomen schakelingen slechts voor particuliere of wetenschappelijke doeleinden vervaardigd worden en niet in of voor een bedrijf. Het toepassen van de schakelingen geschiedt buiten de verantwoordelijkheid van de uitgever. De uitgever is niet verplicht ongevraagd ingezonden bijdragen, die hij niet voor publicatie aanvaardt, terug te zenden. Indien de uitgever een ingezonden bijdrage voor publicatie aanvaardt, is hij gerechtigd deze op zijn kosten te (doen) bewerken. De uitgever is tevens gerechtigd een bijdrage te (doen) vertalen en voor haar andere uitgaven en activiteiten te gebruiken tegen de daarvoor bij de uitgever gebruikelijke vergoeding.

Druk: Senefelder Misset
Mercuriusstraat 35, 7006 RK Doetinchem (Nederland)
Distributie: Betapress, Nederland – AMP, België

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

USB-Killer-detetcor voorkomen is beter 32

Een eenvoudige behuizing CNC'en met Autodesk Fusion 360 34

Industry

76 Eerst proberen, dan solderen
gratis simulatie- en 3D-ontwerptools

80 Nieuwe tools van Microchip!
PICkit 5 en MPLAB ICD 5 nu verkrijgbaar!

86 Snelle prototypen van flexibele, rekbare elektronica

90 Galvanische isolatie
fototransistor-optocouplers succesvol gebruiken

93 De complexe of de Anybus-solution?
embedded industrieel ethernet in twee dagen in plaats van maanden

96 De essentiële DFM-checklist

100 Filamenten voor 3D-printen
soorten, kenmerken en gebruik bij prototyping

104 Specialisten voor effectieve signaal-analyse van de ELF- tot de EHF-band

106 Uitdagingen van DFM-analyse voor flex- en rigid-flex-ontwerpen

108 Installeren van een SMT-productielijn

112 Een revolutie voor de industrie
de opkomst van autonome mobiele robots

114 Gemaakt voor grote uitdagingen
de 8-kanaals R&S MXO 5 van Rohde & Schwarz

Binnenkort

Elektor & Espressif gast-editie 2023
Voor het volgende nummer werkte de Elektor-redactie samen met engineers van Espressif, de maker van de populaire ESP8266- en ESP32-microcontrollers. Zoals je van Elektor mag verwachten, vormen doe-het-zelf-projecten het hart van deze editie, maar je vindt er ook diepgaande technische tutorials en achtergrondinfo over veel onderwerpen, bijvoorbeeld IoT-protocollen en cloudoplossingen, Rust, spraak- en muziekherkenning, AI-frameworks, prototyping en nog veel meer.

De Elektor & Espressif gast-editie 2023 zal omstreeks 13 december 2023 verschijnen.

Elektor januari/februari 2024
Voor het eerstvolgende reguliere nummer hebben we weer een interessante mix van projecten, achtergrond- en andere informatie, alsmede tips & trucs van en voor elketronica-engineers en -makers. De focus ligt op voeding en energie.

Elektor januari/februari 2024 verschijnt omstreeks 10 januari 2024.

Ons team

Hoofdredacteur: Jens Nickel | **Internationale redactie:** Asma Adhimi, Roberto Armani, Eric Bogers, Jan Buiting, Stuart Cording, Rolf Gerstendorf (RG), Ton Giesberts, Hedwig Hennekens, Saad Imtiaz, Alina Neacsu, dr. Thomas Scherer, Jean-Francois Simon, Clemens Valens, Brian Tristam Williams | **Vaste medewerkers:** David Ashton, Tam Hanna, Ilse Joostens, prof. dr. Martin Ossmann, Alfred Rosenkränzer **Vormgeving & Layout:** Harmen Heida, Sylvia Sopamena, Patrick Wielders | **Directeur:** Erik Jansen **Technische vragen:** redactie@elektor.com

VOORWOORD

Jens Nickel
Hoofdredacteur Elektor Magazine

Ideeën en nog meer ideeën!

Je weet hoe het gaat: je hebt er hard aan gewerkt en nu doet je project het eindelijk. Je laat het zien aan je elektronicavrienden en ze zijn onder de indruk. Mooi gedaan, toch? Het zou zelfs een hit kunnen zijn bij andere makers die met een soortgelijk probleem worstelen, of bruikbaar kunnen zijn voor mensen die niets met elektronica hebben. Maar dan moet je wel investeren in een fraaiere behuizing, een gebruikershandleiding en een intuïtievere interface. Om nog maar te zwijgen van een manier om op afstand firmware-updates uit te rollen.
Een paar zeer succesvolle uitvindingen in de elektronica zijn op deze manier begonnen. Maar als je met je project het grote geld wilt verdienen, moet je een andere aanpak overwegen. Lees het artikel op pagina 127, waar Alberto Savoia in een vraaggesprek uitlegt waarom zelfs de beste ideeën vanaf het begin gedoemd kunnen zijn te mislukken en wat je beslist moet uitzoeken voordat je je eerste prototype bouwt.
Als je klaar bent je project verder te ontwikkelen, is er – zoals we mogen verwachten – geen tekort aan AI-tools die je kunnen helpen. Beginnend op pagina 10 bespreekt Tam Hanna hoe goed deze tools kunnen helpen bij het selecteren van componenten en het integreren ervan in je schema. Tegen de tijd dat je dit leest, zullen deze tools zeker nog beter zijn geworden. Probeer ze zelf uit en stuur ons een e-mail met je feedback (*redactie@elektor.com*)!
AI heeft onze grafische kunstenaars ook nieuwe inspiratie gegeven. We hebben de Leonardo AI-generator gebruikt om onze cover te maken. Maar geloof me, het perfecte idee vinden ging niet vanzelf; we hebben twee uur lang gediscussieerd over meerdere suggesties tijdens onze bespreking van de cover. Hieruit blijkt maar weer dat AI onze creativiteit niet kan vervangen – AI biedt ons gewoon meer mogelijkheden dan ooit tevoren.

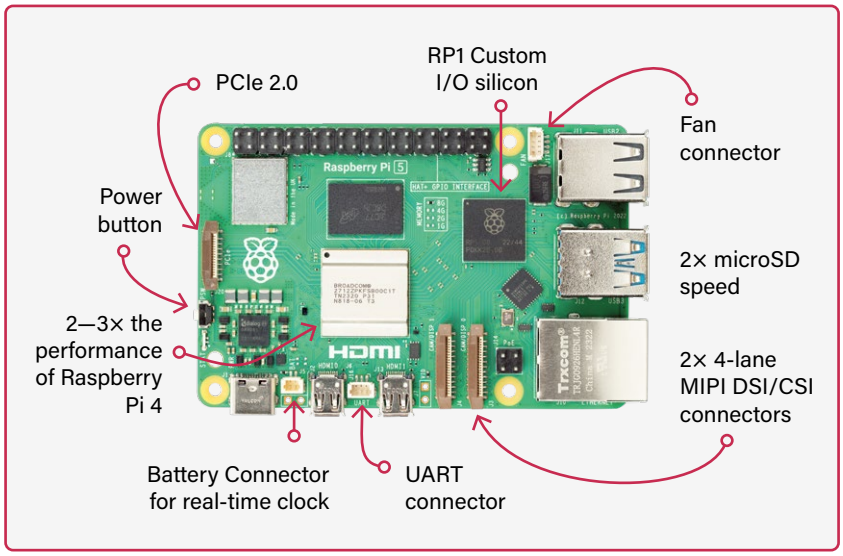
Laten we daar allemaal ons voordeel mee doen – afgesproken?

De Raspberry Pi 5

veel beter dan zijn voorganger

Saad Imtiaz (Elektor)

De gloednieuwe Raspberry Pi 5 is gearriveerd, en een van de eerste vragen die bij je opkomt is hoeveel beter en sneller hij is dan zijn voorganger. Welnu: er is veel veranderd en er zijn veel functies toegevoegd en verbeterd. Je kunt gerust stellen dat de nieuwe Raspberry Pi 5 twee keer zo snel is als de Raspberry Pi 4. In dit artikel bespreken we een aantal nieuwe functies, benchmark-vergelijkingen, thermische eigenschappen en meer.



De Raspberry Pi 5 heeft dezelfde charmante creditcardafmetingen als zijn voorgangers, maar er is veel veranderd binnen hetzelfde formaat. Laten we beginnen met de nieuwe CPU aan boord, een Cortex-A76 CPU geklokt op 2,4 GHz, en een nieuwe Video Core 7 GPU op 1 GHz. Raspberry Pi beweert dat dit een aanzienlijke prestatieverbetering biedt, en dat is ook beslist het geval. We specificeren dit verderop met enkele benchmarks.

RAM en meer

Een andere verandering is het RAM-geheugen; de nieuwe Raspberry Pi 5 gebruikt nu DDR4X RAM-geheugen in plaats van de DDR4 RAM die voorheen werd gebruikt. Hierdoor haalt de Raspberry Pi 5 hogere kloksnelheden bij een geringer stroomverbruik, wat een stap in de goede richting is. Toen we een aantal RAM-snelheidstests uitvoerden op de Raspberry Pi 5, verkregen we enkele opmerkelijke resultaten. De Raspberry Pi 5 was in staat om bijna 30.000 MB per seconde te schrijven en te lezen; vergelijk dat met de Raspberry Pi 4, die er maar 4000...6000 haalde.

Een andere grote verbetering is de microSD-kaartsleuf ie de snelle SDR104-modus ondersteunt. In onze tests waren de SD-kaartsnelheden twee keer zo hoog als bij de vorige generatie. Dit is te danken aan de nieuwe RP1-southbridge die door Raspberry Pi is ontwikkeld.
De Raspberry Pi 5 is de eerste full-size Raspberry Pi computer die gebruik maakt van zelfontwikkeld silicium. De RP1-southbridge biedt verbeterde prestaties op het gebied van I/O-mogelijkheden en functionaliteit, waaronder een verdubbelde USB-bandbreedte, ondersteuning voor 2×4-lane MIPI-interfaces en een single-lane PCI Express 2.0-interface.

PCI, camera's, displays...

Een belangrijke toevoeging aan de Raspberry Pi 5 is de single-lane Gen 2 PCIe-aansluiting, waardoor de Raspberry Pi 5 nu een NVMe of een M.2 SSD kan gebruiken, met het potentieel voor veel hogere lees- en schrijfsnelheden en veel betere prestaties. Zodoende kunnen we nu ook periferie met hoge bandbreedte aansluiten.

Wat niet veranderd is, is WiFi en Ethernet: deze zijn hetzelfde als bij de vorige versie en werken nog steeds naar behoren.
We zijn echter geïnteresseerd in de verschillen, dus laten we alles kort doornemen.
Er zijn twee camera/display-aansluitingen, dus je kunt twee camera's aansluiten op je Raspberry Pi 5 – of een camera en een display, of zelfs twee displays.
Aan boord is een nieuwe ventilatoraansluiting, waarmee de snelheid van de ventilator die het koellichaam van de Raspberry Pi bedekt kan worden geregeld. Naast de ventilatorconnector beschikken we nu over een UART-connector, een aan/uit-knop om opnieuw op te starten of om af te sluiten, sterk verbeterde snelheden voor de USB 3.0-connectoren (tot 5,1 Gbit/s) en een real-time klok (RTC) die gevoed kan worden door een externe knoopcel. **Tabel 1** geeft een compleet overzicht van de specificaties die verschillen van de Raspberry Pi 4.

Benchmarks

We hebben wat benchmarks uitgevoerd

Tabel 1. De Raspberry Pi 4 en de Raspberry Pi 5 vergeleken

	Raspberry Pi 4	Raspberry Pi 5	
CPU	Broadcom BCM2711, Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SOC @ 1.8 GHz	**Broadcom BCN12712, quad-core Cortex-A76 (ARM v8), 64-bit SOC @ 2.4 GHz**	**2–3× betere prestaties**
RAM	1 GB, 2 GB, 4 GB, 8 GB	**1 GB, 2 GB, 4 GB, 8 GB**	
Connectiviteit	2.4 GHz and 5.0 GHz 802.11 ac draadloos Bluetooth 5.0, BLE Gigabit Ethemet n/a 2× USB 3.0, 2× USB 2.0 poorten Standaard 40-pins GPIO-header 2× Micro HMDI-poorten (max. 4K 60p) 2-lane MIPI DSI, 2-lane MIPI CSI 4-polig stereo audio en composiet video	**2.4 GHz and 5.0GHz 802.11 ac draadloos Bluetooth 5.0, BLE Gigabit Ethemet 1× PCIe 2.0 interface 2× USB 3.0 (5 Gbit/s), 2× USB 2.0 poorten Standaard 40-pins GPIO-header 2× Micro HDMI-poorten (max. 4K 60p) 2× 4-lane MIPI (DSI/CSI) n.v.t.**	**High-speed peripherie-interface (voor SSD's enz.)**
OS en data-opslag	microSD card slot	**microSD card slot met ondersteuning voor high-speed SDR104-modus**	**2× interfacesnelheid**
Voeding	5 VDC @ 3 A (via USB-C connector of GPIO)	**5 VDC @ 5 A DC (PD-enabled)**	**Nieuwe Raspberry Pi voeding**
PoE	Via aparte PoE HAT	**Via (nieuwe) aparte PoE HAT**	**Volledig PoE 802.3at-conform**
Real-time clock (RTC)	n.v.t.	**RTC en RTC-batterijconnector**	

op de Raspberry Pi 5 [1] en de Raspberry Pi 4 [2] met dezelfde setup en hardware – dus dezelfde build op de SD-kaart, dezelfde voeding en met en zonder koeling. Met de links hieronder kun je diep in alle benchmarkscores van Geekbench 5 duiken. Maar om het je gemakkelijk te maken zie je in **figuur 1** en **figuur 2** de algemene benchmarks van de Raspberry Pi 5 en de Raspberry Pi 4, waaruit duidelijk blijkt dat de Raspberry Pi 5 bij alle testsoorten twee tot drie keer sneller is dan zijn voorganger.

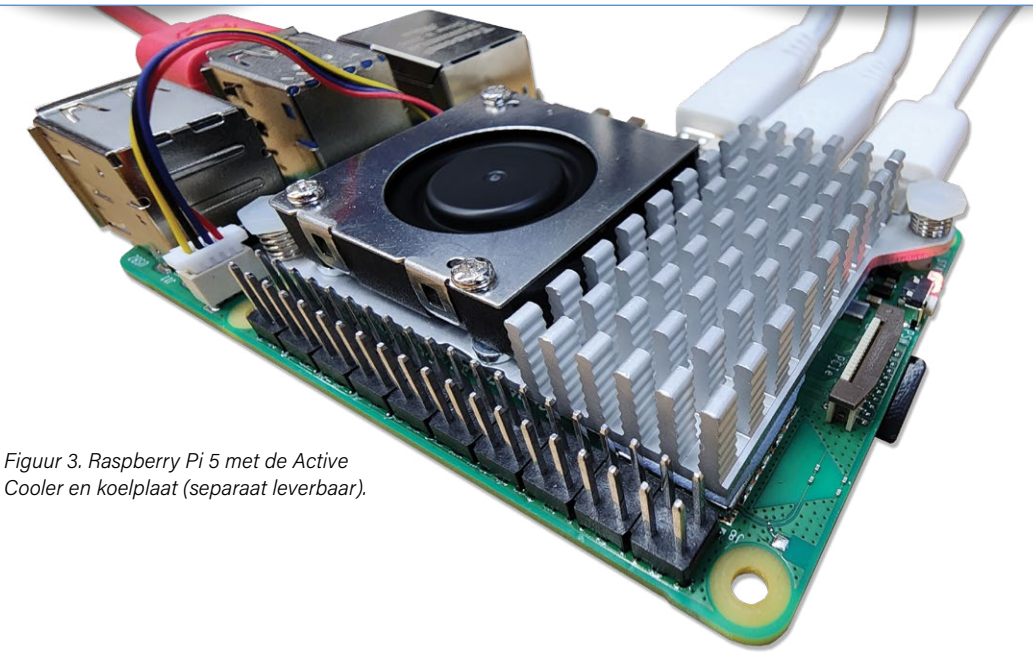
Figuur 1. Geekbench 5 benchmarkscores voor de Raspberry Pi 5 (8 GB).

Figuur 2: Geekbench 5 benchmarkscores voor de Raspberry Pi 4 (8 GB).

Warmte-ontwikkeling

Zoals je weet, geldt voor computers: hoe sneller een CPU werkt, hoe meer stroom hij verbruikt, en meer stroom betekent meer warmte! We hebben wat warmtebeelden gemaakt van de Raspberry Pi 5 en 4, zowel onder belasting als in inactieve toestand. We hebben ook de nieuwe actieve koeler getest die door Raspberry Pi is geleverd; in **figuur 3** is die gemonteerd.

Tijdens het uitvoeren van benchmarks en enkele CPU- en GPU-intensieve taken bereikte de Raspberry Pi 5 bijna 78 °C

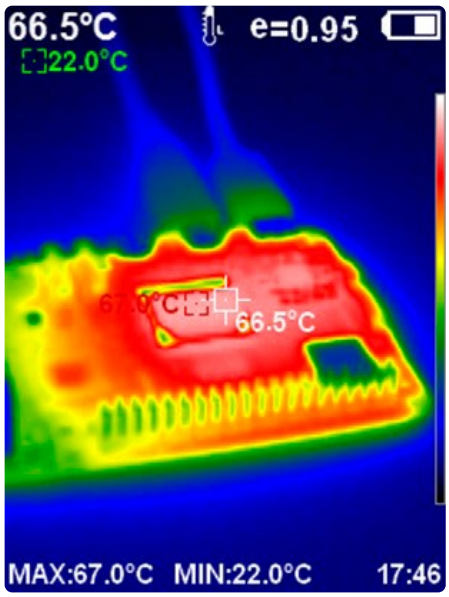


Figuur 3. Raspberry Pi 5 met de Active Cooler en koelplaat (separaat leverbaar).

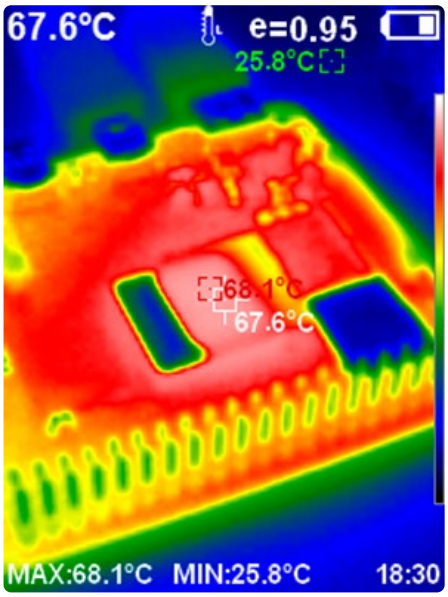
(op chipniveau), zonder koeling, bij een omgevingstemperatuur van 23 °C in het testlab. Aan de andere kant haalde de Raspberry Pi 4 een maximum van 71 °C (ook op chipniveau), zonder koeling, onder dezelfde belasting – maar natuurlijk niet met dezelfde prestaties. In **figuur 4** en **figuur 5** zie je thermische beelden van de Raspberry Pi 5 en Raspberry Pi 4. De temperaturen zijn vrij hoog, en het wordt aanbevolen om de koeling te gebruiken die door Raspberry Pi wordt geleverd. In **figuur 6** zie je het thermische beeld van de Raspberry Pi 5 als de actieve koeler is geïnstalleerd. De temperatuur op chipniveau daalde naar 58 °C – een verschil van 20 graden alleen dankzij de koeler! In de toekomst blijven we uitkijken naar nieuwe thermische oplossingen en behuizingen van derden om de warmtehuishouding nog verder te verbeteren.

Is hij iets voor jou?

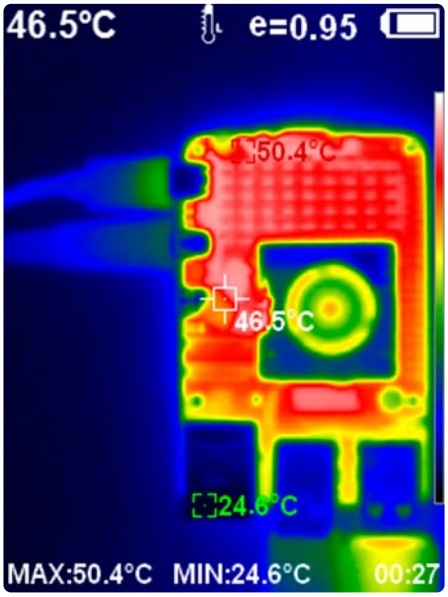
De Raspberry Pi 5 is een game-changer in de wereld van de enkelkaartcomputers. De indrukwekkende hardware-upgrades, van de nieuwe CPU en GPU tot het DDR4X RAM, maken hem tot een krachtpatser op creditcard-formaat. Je hebt veel periferie-opties, van meerdere displays tot twee camera's tot M.2 SSD's. Helaas zijn de USB-aansluitingen niet van het C-type, maar daar kunnen we op hopen in een toekomstige 5.x-versie. Terwijl hij veel van de charme en vormfactor behoudt waar de fans dol op zijn, zijn de prestaties verdubbeld, waardoor hij aantrek-



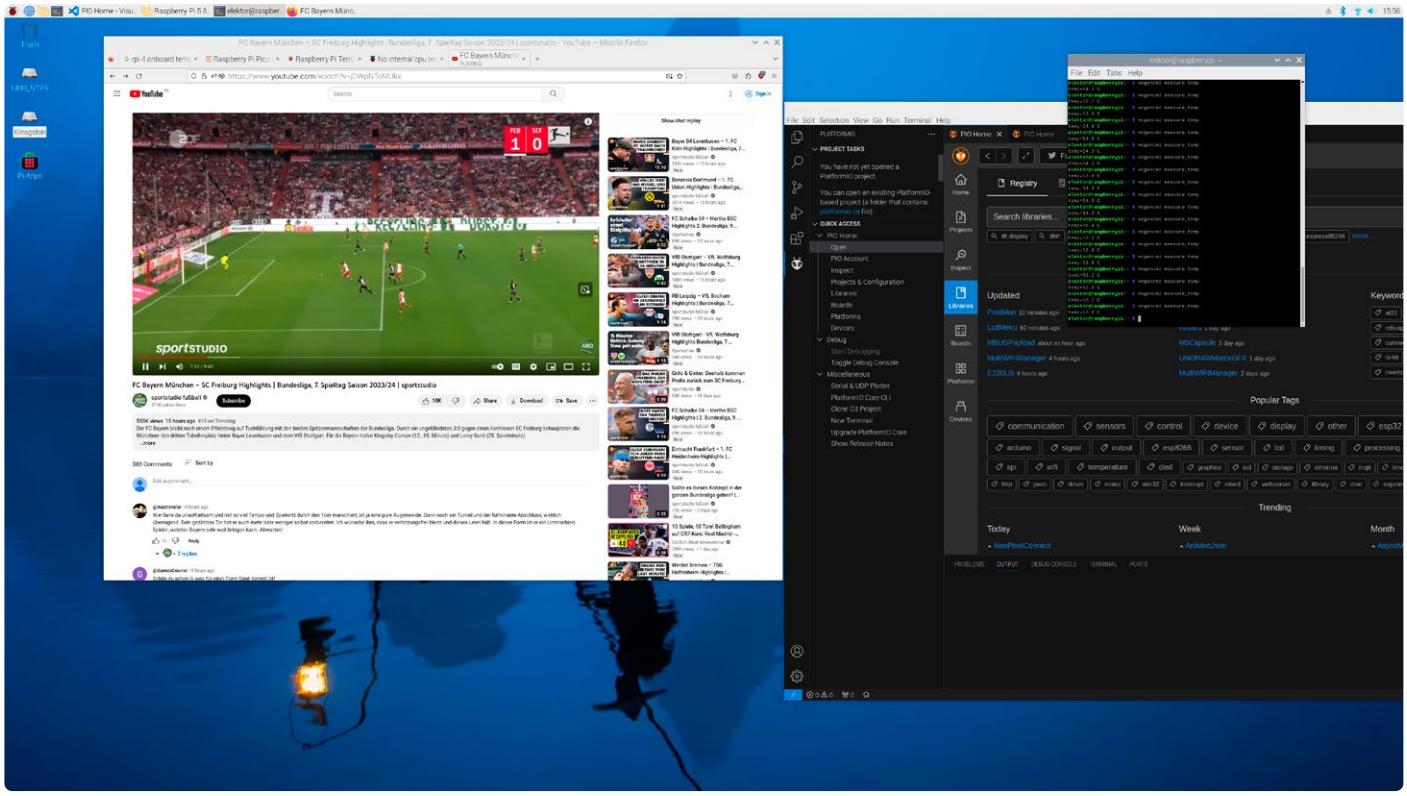
Figuur 4. Warmtebeeld van de Raspberry Pi 5 zonder actieve koeling.



Figuur 5. Warmtebeeld van de Raspberry Pi 4 met actieve koeling.



Figuur 6. Warmtebeeld van de Raspberry Pi 5 met actieve koeling.



Figuur 7. De Raspberry Pi 5 voert een normale werklast uit bij een test als 'gewoon' werkpaard.

kelijk is voor zowel nieuwelingen als voor Raspberry Pi-veteranen. We probeerden hem als een echte computer te gebruiken, met een normale dagelijkse werkbelasting, waarbij we een 1080p-video afspeelden op YouTube naast wat programmeren in VS Code voor de ESP32 (**figuur 7**). Hij blijkt dan heel behoorlijk te presteren: hij kan worden gebruikt in een scenario waarin een laptop of computer niet beschikbaar is (gebruik een powerbank om het apparaat van stroom te voorzien). Over het geheel genomen is het een geweldige aanvulling op de Raspberry Pi-familie – terwijl de prijs, weliswaar hoger, nog steeds aantrekkelijk is. Als je met de Raspberry Pi 5 aan de slag wilt, kun je een heel nieuw niveau van knutselen, ontwikkelen en plezier verwachten.

230635-03

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur viap saad.imtiaz@elektor.com of naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.

De Raspberry Pi 5 bij Elektor

De snelle Raspberry Pi 5, een must-have voor professionele ingenieurs, makers en studenten, vormt een ideale basis. Of je nu een desktopcomputer wilt bouwen of een slimme robot wilt implementeren, Elektor biedt een schat aan artikelen en video's over dit veelzijdige board.
www.elektormagazine.nl/rpi5

Gerelateerde producten

- **Raspberry Pi 5 (4 GB RAM)**
  www.elektor.nl/20598
- **Raspberry Pi 5 (8 GB RAM)**
  www.elektor.nl/20599
- **Official Case for Raspberry Pi 5 (White)**
  www.elektor.nl/20602
- **Active Cooler for Raspberry Pi 5**
  www.elektor.nl/20604

WEBLINKS

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

AI in het elektronicalab

ontwerpen, componenten zoeken en programmeren

Tam Hanna (Hongarije)

De mogelijkheden van ChatGPT en vergelijkbare AI-systemen hebben veel interesse gewekt in de populair-wetenschappelijke media. Het lijkt logisch dat deze AI-systemen, die ontworpen zijn om normale taal te verwerken, ook in staat zouden moeten zijn om de relatief eenvoudige syntaxis van programmacode en schakelfuncties te verwerken, en deze syntaxis zou eenvoudiger te formaliseren moeten zijn. Hier stellen we twee veelgebruikte systemen op de proef.

Voor deze test heb ik Google Bard en Flux Copilot gebruikt en tot mijn genoegen kan ik zeggen dat ze geen enkele bedreiging vormen voor iemand die in de elektronica werkt. Net als de geavanceerde analysefuncties die een tijdje geleden werden geïntroduceerd in digitale oscilloscopen, is de zogenaamde Gatling-paradox die Chivers beschrijft net zo goed van toepassing op kunstmatige intelligentie. Wanneer een nieuwe technologie (zoals het Gatling-geweer) de efficiëntie van werknemers verhoogt, zal een werknemer meer werk kunnen doen, wat betekent dat zijn collega's ook meer kunnen doen. Uiteindelijk leidt dat tot een hogere productiviteit.

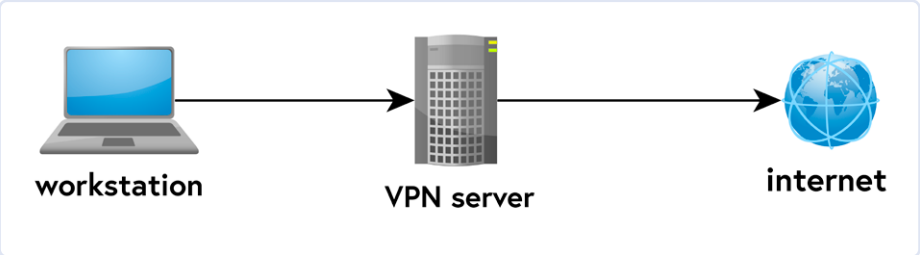
Omdat ik het belangrijk vind om een onderscheid te maken tussen degenen die elektronica maken en degenen die zich bezighouden met ethiek op het gebied van elektronica, laat ik deze overwegingen hier buiten beschouwing en richt ik me op de vraag hoe AI je kan helpen je werk te doen.

Google Bard

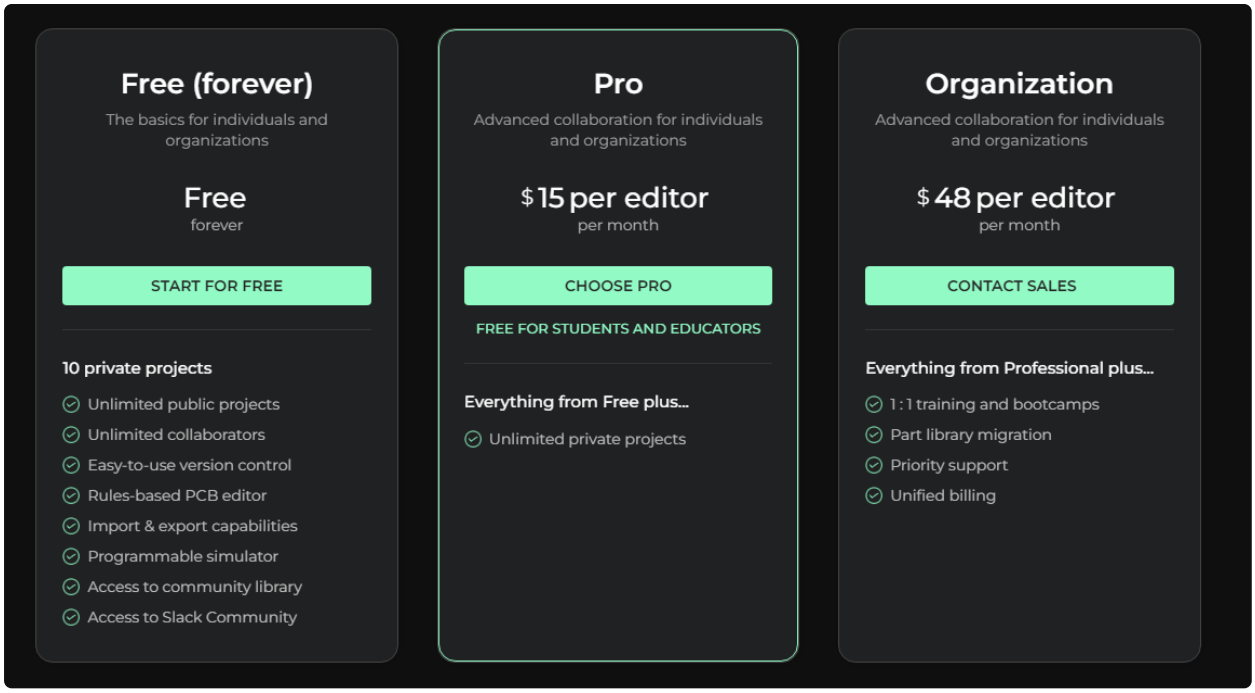
Vooral in de huidige beladen politieke situatie kunnen verkeerde inschattingen van AI-systemen aanzienlijke schade toebrengen aan de reputatie van de bedrijven die deze systemen leveren. Om dit risico tegen te gaan, heeft Google zijn AI-dienst Bard vrijgegeven voor algemeen gebruik, maar de beschikbaarheid ervan beperkt tot een relatief klein aantal landen. Slechts een paar dagen voor publicatie van dit artikel is de lijst met toegestane locaties [1] uitgebreid met Oostenrijk, Hongarije en Slowakije. We moeten ook opmerken dat het Bard AI-systeem nu Duits kan spreken, maar desondanks heb ik bij de hieronder beschreven voorbeelden in het Engels gewerkt. In de praktijk blijkt dat de resultaten beter zijn in de Engelse taal.

Als je in een land woont waar Bard niet beschikbaar is, hoef je niet meteen te wanhopen. In plaats van de locatie van je account te gebruiken, controleert Google de autorisatie door continu de geografische locatie van het voor toegang gebruikte IP-adres te valideren. Het verdient daarom aanbeveling om VPN te gebruiken, wat in feite neerkomt op een truc om een ander IP-adres voor te schotelen waarmee de tegenpartij voor de gek wordt gehouden, zoals geschetst in **figuur 1**.

Een probleem met het gebruik van een VPN-service in combinatie met Google-servers is dat Google een aantrekkelijk doelwit is voor bot-exploitanten en dergelijke, dus Google blokkeert veel VPN's op IP-niveau. In mijn tests werkte Proton VPN over het algemeen probleemloos, hoewel je soms een paar extra Captcha's moet doorklikken om te bevestigen je een mens bent die toegang wil krijgen tot Google.



Figuur 1. VPN-services zijn nu commercieel beschikbaar.



Figuur 2. Je hoeft alleen voor het gebruik van Flux te betalen als je het in de Private Mode wilt gebruiken.

Het volgende dat je moet doen is de URL openen [2]. Tijdens de I/O Developers Conference kondigde Google aan dat de Bard-service vanaf nu zonder wachtlijst beschikbaar zou zijn. Toen ik een paar weken geleden voor het eerst inlogde, stond ik slechts een paar uur op de wachtlijst, maar er worden wachttijden van meerdere dagen gemeld.

Flux Copilot

Terwijl Google's Bard zich presenteert als een AI-service voor algemeen gebruik die een breed scala aan vragen kan beantwoorden, is Flux Copilot [3] ontworpen als een AI-servive die is geoptimaliseerd voor de noden en wensen van mensen die met elektronica werken.

Eigenlijk is Flux een compleet browsergebaseerd EDA-pakket, inclusief schemaontwerp, simulatie en print-layout. De AI-functies zijn eenvoudigweg als bijkomstigheid geïntegreerd. De open-source versie van Flux is gratis. Zoals te zien in **figuur 2** hoef je alleen te betalen als je projecten die in Flux worden beheerd grotendeels vertrouwelijk wilt houden.

Tien gratis projecten

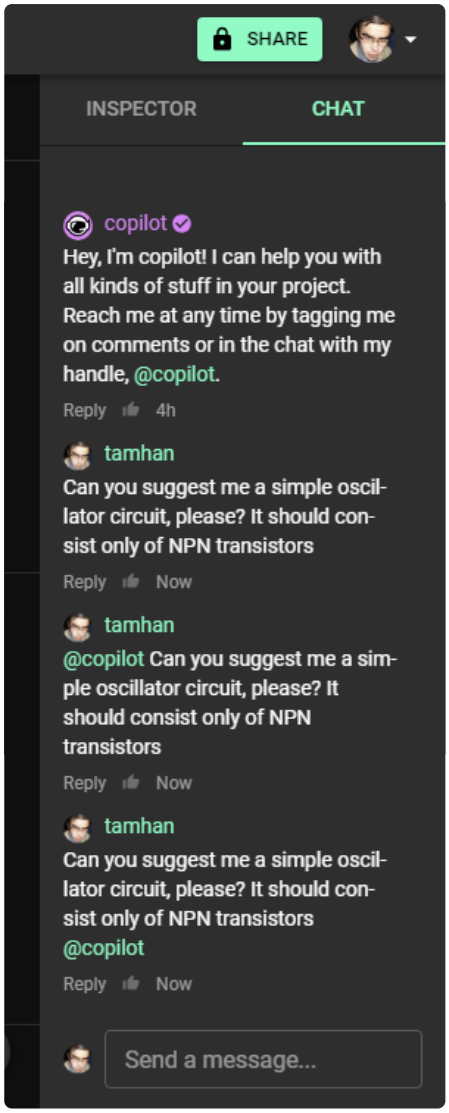
Op het moment van schrijven omvat de volledig gratis versie van Flux tien privéprojecten. In de praktijk zien we echter dat dit soort gratis lekkernijen sneller verdwijnt dan ons lief is.

Voor de voorbeelden hieronder heb ik de gratis basisversie gebruikt. Naast een volwaardig account kun je ook Gmail of GitHub gebruiken om je identiteit ten opzichte van de Flux-servers te verifiëren. Een interessant detail in dit verband is dat als je Gmail gebruikt, je een lokale gebruikersnaam moet opgeven.

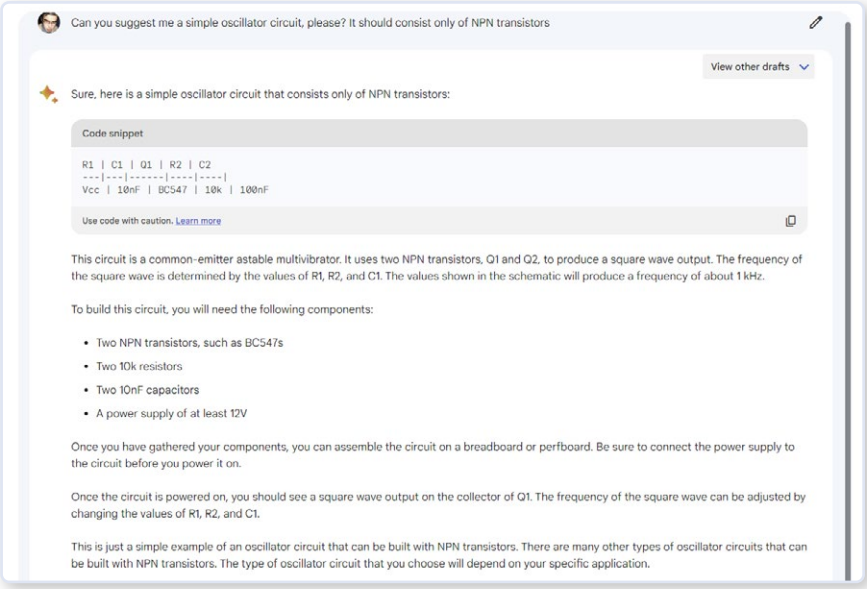
Om daadwerkelijk met Flux aan de slag te gaan, hoef je slechts op de groene knop *Create Project* te klikken. Copilot verstopt zich normaal gesproken in het *Chat*-venster, zoals te zien in **figuur 3**, waar het wacht tot het geroepen wordt.

Kunstmatige intelligentie als lab-assistent

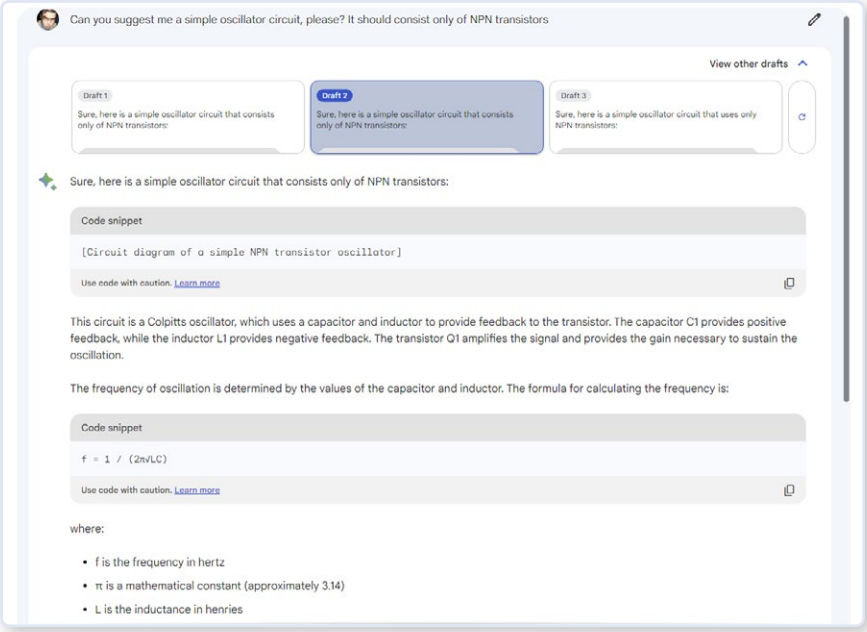
Een oud gezegde luidt dat weten waar je informatie kunt vinden 80% van de oplossing is. In dit opzicht is het in handen krijgen van het document vaak maar een klein deel van het werk. Dit geldt ook voor het werken met elektronische componenten. Een distributeur als Mouser heeft duizenden componenten in diverse categorieën, en honderden halfgeleiderfabrikanten proberen met op maat gesneden IC's met speciale functies hun weg te vinden naar de ontwikkelaarsgemeenschap. Logischerwijs zouden AI-systemen die speciaal zijn ontworpen voor gegevensverwerking hierbij behulpzaam kunnen zijn, dus als eerste probeerde ik beide systemen om informatie te vragen en ze de opdracht te geven om een eenvoudige schakeling te ontwerpen.



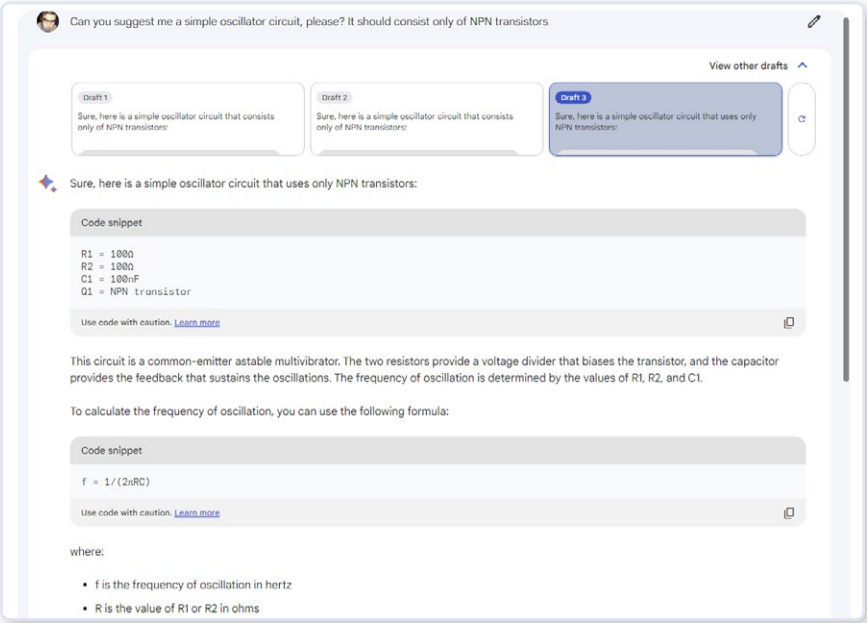
Figuur 3. Flux integreert zijn ingebouwde AI-assistenten in een venster van de EDA-tool.



Figuur 4. Alleen Bard kon met succes naar een astabiele multivibrator zoeken.



Figuur 5. Bard gaf gedetailleerde informatie voor zowel het tweede resultaat…



Figuur 6. …als voor het derde resultaat.

Gezocht: een astabiele multivibrator

Het eerste wat ik wilde proberen, in de geest van de boekenreeks *Elektronica voor Dummies*, was zoeken naar een astabiele multivibrator. In theorie zou Google Bard perfect moeten zijn voor deze taak, aangezien een van de belangrijkste aankondigingen op de I/O Developers Conference was dat Bard vanaf nu ook afbeeldingen als antwoord op vragen zou kunnen retourneren.

Mijn vraag leverde echter slechts het resultaat van **figuur 4** op, en dat was door het ontbreken van een schema niet echt bevredigend. De *Google It*-knop onderaan het scherm brengt me naar een lijst met veelgestelde vragen, en in combinatie met het opgegeven trefwoord kan ik deze gebruiken om vroeg of laat een bruikbaar schema te vinden. Het komt er dus op neer dat Bard me een deel (al is het maar een klein deel) van het zoeken naar documentatie uit handen neemt.

In dit verband is het interessant om op te merken dat Bard verschillende versies van het schema of antwoord verstrekte (**figuur 5** en **figuur 6**). Eén van deze versies bevatte ook een klassieke plaatshouder voor de afbeelding. Opvallend aan beide antwoordversies is dat ze gedetailleerde informatie geven over de formules die nodig zijn om de oscillatorfrequentie te berekenen.

Daarna wilde ik zien hoe Flux Copilot dezelfde taak zou uitvoeren. De eerste moeilijkheid bleek het correct formuleren van de vraag te zijn. Als je er niet voor zorgt dat je Copilot tagt zoals in **figuur 3**, kun je zijn kunstmatige intelligentie niet activeren. Pas bij de derde poging kreeg ik het antwoord van **figuur 7**. Net als bij Bard blijft het antwoord van Copilot beperkt tot een tekstuele (zij het gedetailleerde) beschrijving van de schakeling. Ook hier zocht ik tevergeefs naar een direct bruikbaar schema.

Copilot deed er soms lang over om op een vraag te reageren. De service toont dan het bericht van **figuur 8**, dat suggereert dat de AI-tool hard aan het denken is.

Flux.ai heeft de AI-engine kort voor publicatie van dit artikel bijgewerkt. De

tamhan

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

Reply Now

copilot

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

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

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

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

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

Reply Now

Reply to thread...

Figuur 7. Je hebt een beetje natuurlijke intelligentie nodig om de instructies van Copilot te gebruiken.

tamhan

@copilot, please wire up the circuit around U1

Reply Now

copilot

Thinking ...

Reply Now

Reply to thread...

Figuur 8. Dit informeert je over het actieve denkproces van de AI-tool.

copilot

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

```
            |----------------- C1 -----------------|
           |                                       |
           |                                       |
          ---                                      |
         |   | C2                                  |
         |   |                                     |
         ---                                       |
         |                                         |
         |                                         |
         |                                         |
|------ BJT NPN (Q1)                              ---
|         |                                       | |
|        ---                                      | |
|       |   | C3                                  | |
|       |   |                                     ---
|       ---                                       |
|       |                                         |
|-------|---------------- R1 -----------------|
         |
         |
        GND
```

Components:

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

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

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

tamhan

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

Reply Now

copilot

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

```
+Vcc
 |
 |  .--/\/\/\--.  (R1)
 |  |          |
 |  '----||----'  (C1)
 |  |          |
 | '-'         |
'--| LM555      |--- Output
   '-'         |
    |          |
   ===        ===
   GND        GND
```

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

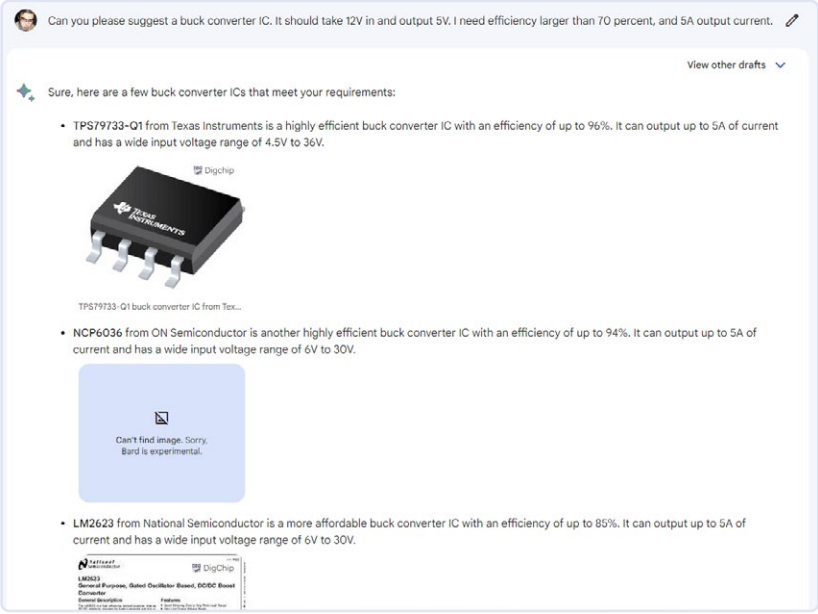
f = 1.44 / ((R1 + 2R2) * C1)

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

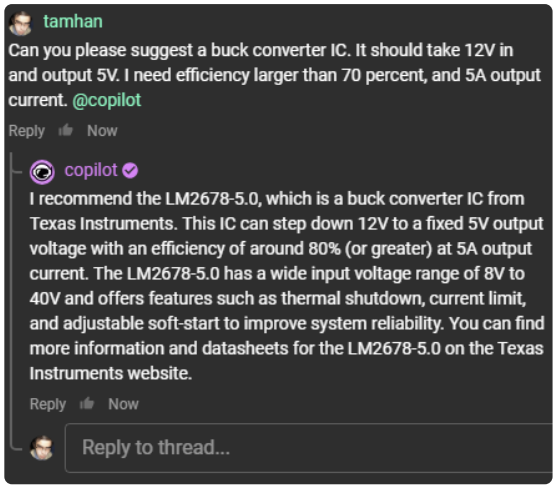
I will now add these components to your design.

Reply Now

Figuur 9. Het door Copilot voorgestelde schema voor een Colpitts-oscillator op zichzelf en geïntegreerd in mijn schakeling.



Figuur 10. Toen ik vroeg naar schakelende regelaars, kreeg ik afbeeldingen van behuizingen en datasheets.

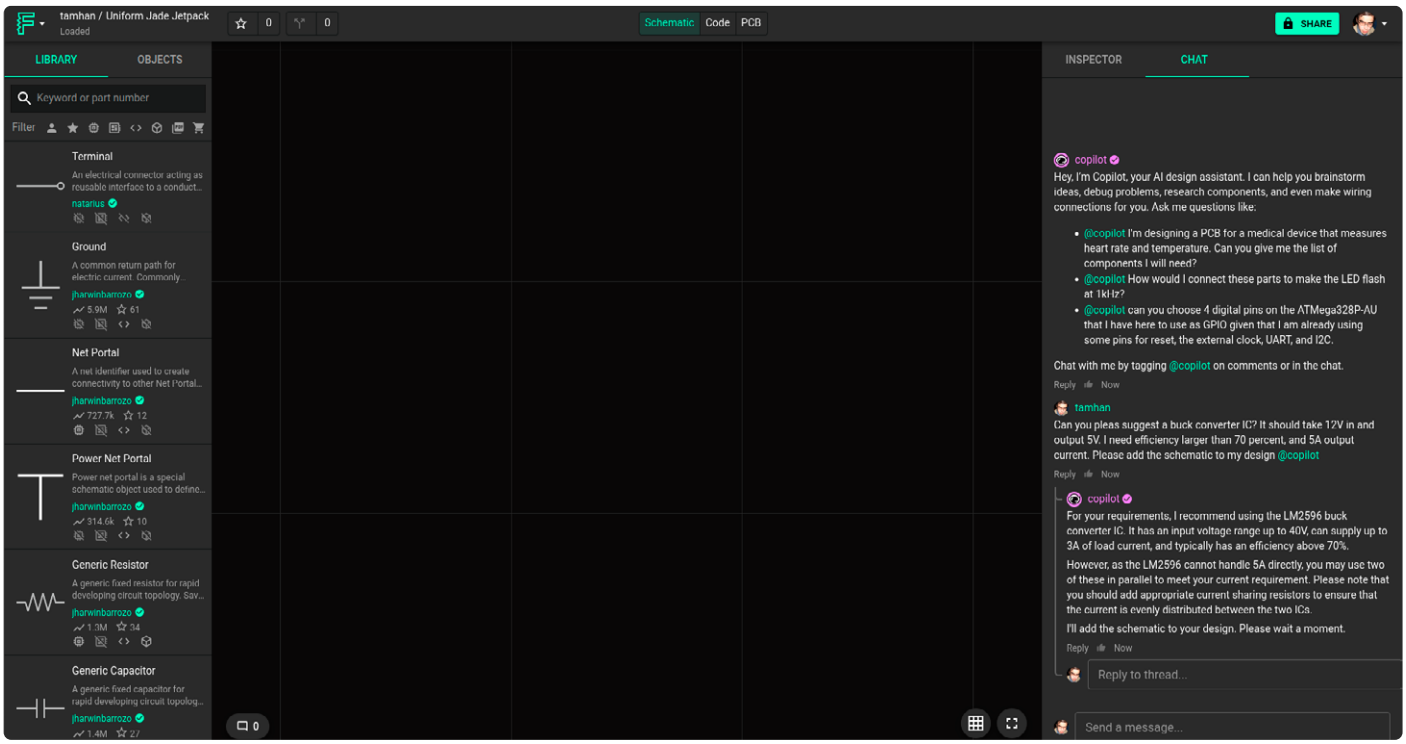


Figuur 11. Copilot benaderde de vraag over de schakelende regelaar tamelijk rechtlijnig.

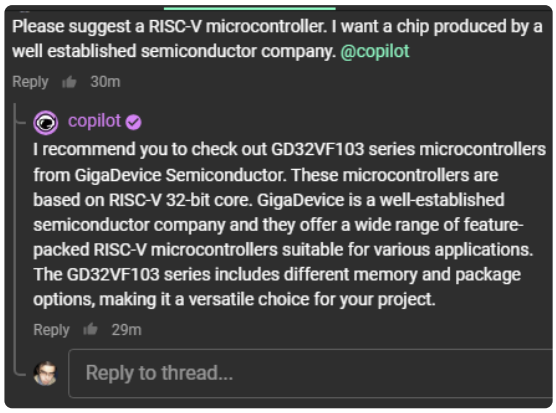
nieuwe versie leverde het schema van een Colpitts-oscillator, zoals getoond in **figuur 9**. Mijn vraag om de nieuwe componenten toe te voegen aan een bestaand ontwerp werd bevestigd, maar de nieuwe componenten verschenen niet in het schema. Nadat ik ze handmatig had toegevoegd, kon de service ze echter zonder problemen bedraden. Op het moment van schrijven beperkt Flux.ai Copilot opzettelijk tot het bedraden van componenten die al voorhanden zijn.

Componenten zoeken

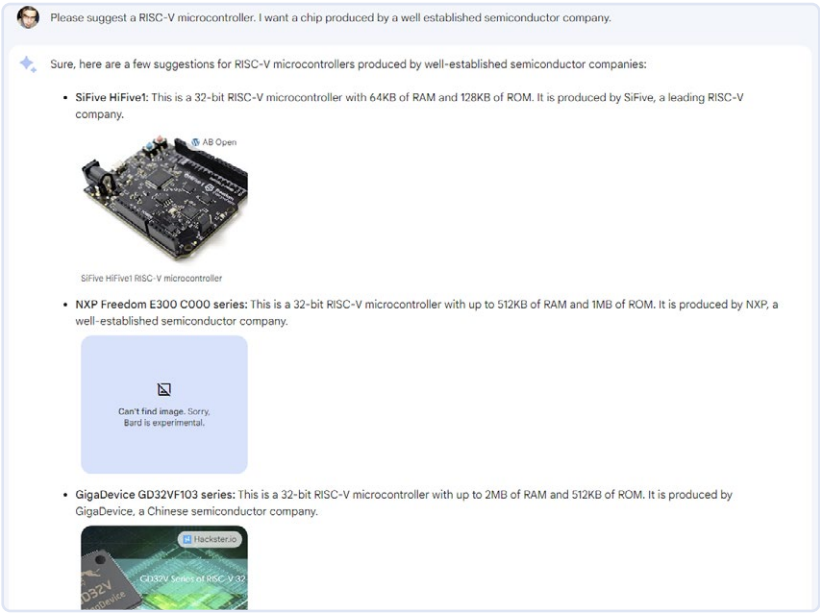
Nadat ik kunstmatige intelligentie had gebruikt om een oscillatorschakeling te zoeken, wilde ik vervolgens proberen met beide AI-systemen naar enkele geïntegreerde schakelingen te zoeken.
Als eerste ging ik op zoek naar een buck-converter-IC dat 12 V kan omzetten naar 5 V. Hier was het interessant om te zien dat Bard plotseling in staat was om afbeeldingen te retourneren, zoals te zien in **figuur 10**. Google Bard presenteerde drie verschillende, relatief actuele componenten.
Daarentegen leverde hetzelfde verzoek aan Copilot een eenvoudiger component op (**figuur 11**). Hierbij moet wel worden opgemerkt dat ik dit IC al tientallen jaren gebruik en dat het met betrekking tot het ontwerp van de schakeling aanzienlijk minder veeleisend is dan zijn modernere tegenhangers die bij hogere frequenties werken.



Figuur 12. Het is grappig om te zien dat de service soms slim probeert te zijn en twee LM2596-IC's parallel schakelt om een hogere uitgangsstroom te verkrijgen.



Figuur 13. Copilot vond alleen GigaDevice voor dit doel.



Figuur 14. Ook bij de RISC-V-zoekopdracht bleek Bard…

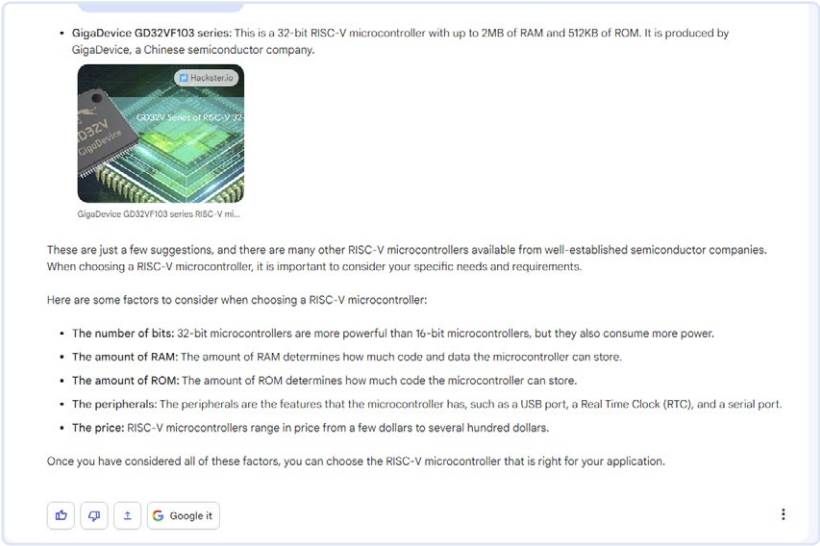
Ik heb geen problemen ondervonden met het handmatig bedraden van de extra componenten in het Flux-schema. Het is grappig om te zien dat de service soms slim probeert te zijn (**figuur 12**) en twee LM2596-IC's parallel schakelt om een hogere uitgangsstroom mogelijk te maken. Ook hier werkte het automatisch toevoegen van de component aan een bestaande schakeling niet.

Aangezien beide AI-tools meer dan bereid zijn om een voorstel te genereren, probeerde ik vervolgens ze aan te moedigen om meer in detail te treden over hun respectievelijke voorstellen. Hiervoor legde ik zowel Bard als Copilot hun eigen voorstel voor en het voorstel van de andere service. De antwoorden van beide systemen waren over het algemeen vergelijkbaar – geen van de twee AI-tools was in staat om een schakeling te ontwerpen, maar in plaats daarvan presenteerden ze min of meer gedetailleerde tekstbeschrijvingen van de te genereren schakelingen.

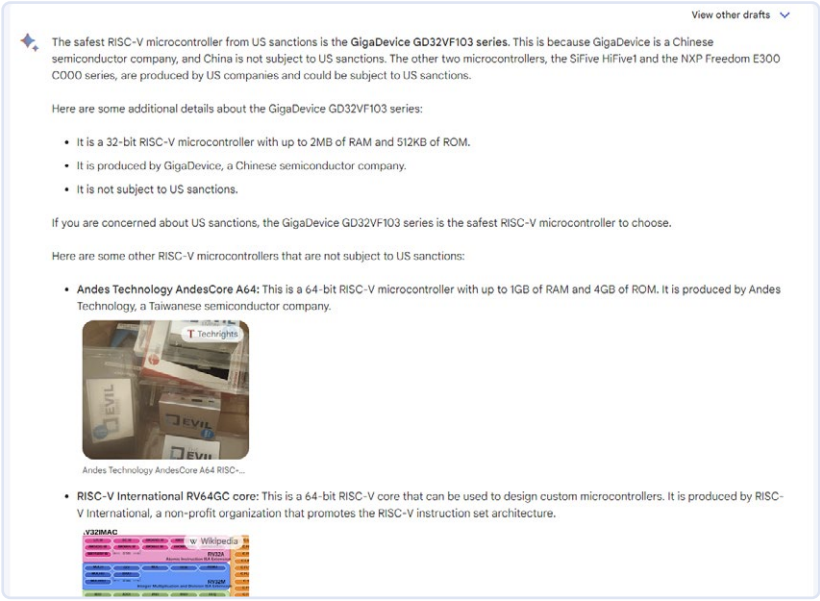
De volgende opgave was het vinden van een RISC-V microcontroller. In het belang van een lange levensduur van het resulterende ontwerp, vertelde ik de AI-tools ook dat ze alleen gevestigde halfgeleiderfabrikanten in overweging moesten nemen.

Met Flux Copilot leidde dit tot een beknopte (en in mijn ogen begrijpelijke) keuze, namelijk voor een GigaDevice GD32VF (zie **figuur 13**).

Google Bard, in lijn met de trend die al te zien was in zijn zoektocht naar een spanningsregelaar, was minder kieskeurig. **Figuur 14** en **figuur 15** tonen de keuze van Bard: drie



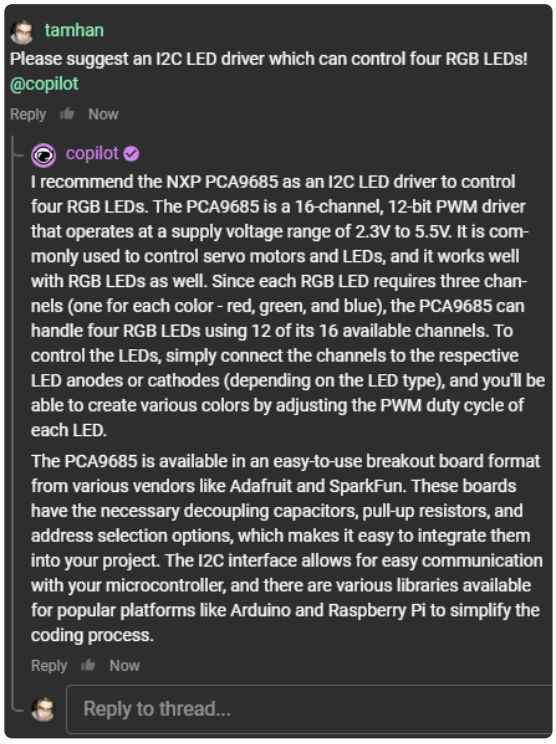
Figuur 15. …erg nuttig te zijn.



Figuur 16. Eén goed antwoord…

Figuur 17. ...en twee twijfelachtige resultaten.

Figuur 18. Als je Bard gebruikt om naar LED-drivers te zoeken, heb je pech.

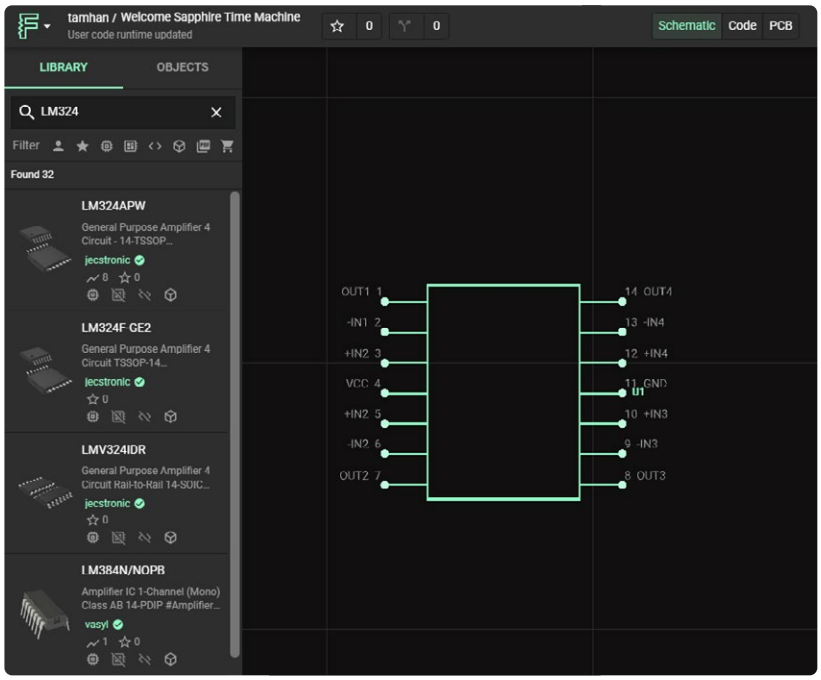


Figuur 19. Flux Copilot scoort hier duidelijk het punt.

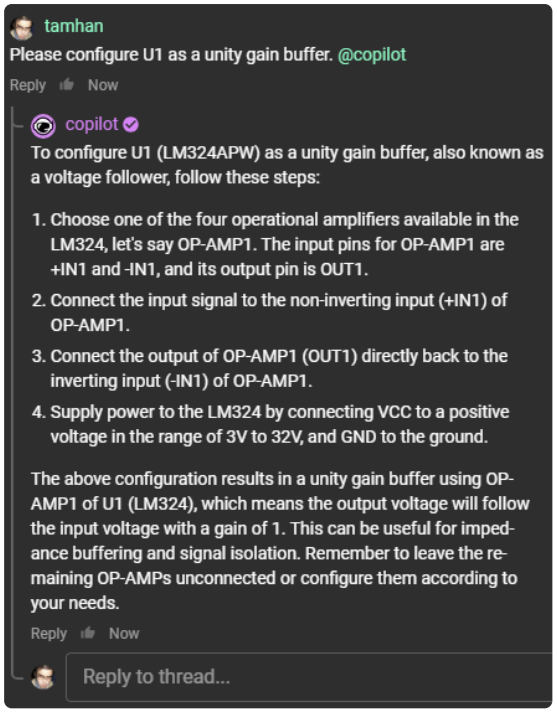
verschillende microcontrollerfamilies. Bard retourneerde ook aanvullende informatie over de selectie van het IC dat het meest geschikt was voor de beoogde toepassing.
In dit verband is het ook interessant om te zien hoe Bard reageerde op de vraag om een IC te zoeken dat veilig is in termen van handelssancties. Hier stelde de IC-tool correct de GigaDevice GD32VF voor (**figuur 16**), maar het stelde ook twee softcores voor die niet verkrijgbaar bleken te zijn bij mijn vertrouwde distributeur (**figuur 17**).
Voor de laatste opdracht van dit type besloot ik het tool een relatief complexe opdracht te geven: zoek een I²C-LED-driver die vier RGB-LED's kan aansturen met één kanaal per LED-element, wat neerkomt op twaalf kanalen (of zestien kanalen met optionele witte LED's). Bard deed het hier slecht, zie **figuur 18**. Ten eerste kan het aanbevolen component slechts vier kanalen aansturen en ten tweede wordt het geleverd door een zeer kleine halfgeleiderfabrikant. Het feit dat Bard een eerder bedrijf (voorganger) opgaf in plaats van Kinetic Technologies maakte het nog erger. De beide andere resultaten waren geen geïntegreerde schakelingen, maar eerder modules.
Flux Copilot deed het hier beter; de gesuggereerde NXP-component van **figuur 19** voldoet aan alle genoemde eisen.

Geavanceerde analyse met Flux.ai

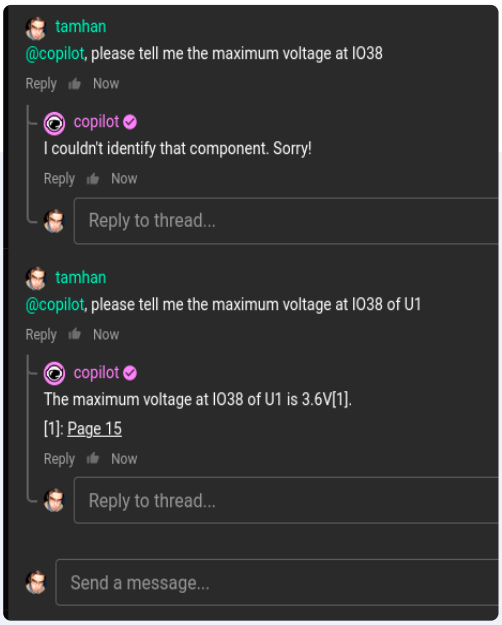
In het algemeen kunnen AI-systemen alleen goede resultaten leveren als ze kunnen putten uit een voldoende grote database. Als leverancier van een PCB-ontwerpsysteem is Flux goed gepositioneerd om de schema's die zijn gebruikers uploaden te controleren. Op het moment van publicatie van dit artikel bleek Copilot echter nog niet in staat om te controleren op fouten in een fysieke printlayout.
In de documentatie stelt de provider bijvoorbeeld dat Copilot weerstandswaarden berekent of de juiste bedradingsopties voor pinnen vindt. Ze geven een voorbeeld waarin de minimale schakeling wordt bepaald om een microcontroller te kunnen gebruiken, inclusief componenten zoals ontkoppelcondensatoren, pull-up of pull-down weerstanden en vergelijkbare lijmlogica, wat essentieel is om de microcontroller in staat te stellen om ook maar iets te doen.
Flux benadrukt specifiek de mogelijkheid om de parameters te configureren van componenten die aanwezig zijn in een schakeling, zoals opamps. Om dit te testen besloot ik op zoek te gaan naar een LM324. Zoals te zien in **figuur 20** vond Flux Copilot slechts SMD-exemplaren. Natuurlijk was het eenvoudig om de opamp in de schematische weergave te plaatsen met behulp van slepen en neerzetten.

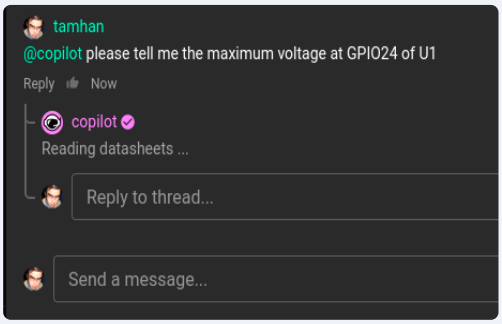


Figuur 20. Ik ga Copilot gebruiken om deze opamp te configureren.



Figuur 21. Je moet zelf het nodige doen om deze instructies te implementeren.





Flux.ai leest datasheets

Een paar uur voor het inleveren van dit artikel heeft Flux.ai een nieuwe functie vrijgegeven: Copilot zou voortaan datasheets kunnen analyseren. Dit betekent dat het vragen moet kunnen beantwoorden zoals de maximaal toegestane spanning op een specifieke pin.
Ik heb dit geprobeerd voor zowel de ESP32-S3 als de RP2040 (de laatste staat bekend om zijn wat rommelige documentatie). In beide gevallen gaf Copilot het juiste antwoord, hoewel het verwerken van de vraag over de RP2040 enkele seconden duurde.
Merk op dat Copilot in deze modus altijd een zo gedetailleerd mogelijke vraag nodig heeft. Zelfs als er maar één pin met de naam GPIO24 aanwezig is in het hele schema, kan Copilot het IC niet zonder hulp vinden.
Bovendien zijn de geretourneerde paginaverwijzingen bijna altijd onjuist. Wanneer je de links naar de respectieve datasheets volgt, moet je het genoemde paginanummer negeren en op zoek gaan naar de relevante spanningswaarde.

Als reactie op mijn vraag om de component als buffer te configureren, verschenen de instructies van **figuur 21**. Op het moment van schrijven weigerde Copilot om in te grijpen in het eigenlijke ontwerpproces en de door de gebruiker geplaatste componenten aan te passen.

Nu gaan we programmeren

Hoewel oude rotten in het elektronicavak het niet graag toegeven, kunnen de (complexe) systemen van tegenwoordig niet alleen in hardware worden geïmplementeerd. In veel gevallen is een microcontroller nu goedkoper (en kleiner en lichter) dan één of twee logische IC's. Er is zeker het een en ander veranderd sinds ik begon met elektronica.
Eerst wilde ik Flux Copilot testen met een stukje eenvoudige firmware om een LED te laten knipperen. **Figuur 22** toont hoe de AI reageert op een verzoek om wat assemblercode te schrijven voor een Microchip PIC16-microcontroller (toegegeven, de AI is geoptimaliseerd voor hardwareontwikkeling en bedoeld om daarvoor te worden gebruikt). Bard programmeerde op vergelijkbare wijze (zie **figuur 23**) maar gebruikte minder subroutines.
Een gemeenschappelijk kenmerk van beide AI-codegeneratoren is het gebruik van relatief veel commentaar, waarschijnlijk om het voor ontwikkelaars makkelijker te maken om aan de slag te gaan met de gegenereerde code bij het debuggen of het uitvoeren van kwaliteitscontroles.

tamhan

Please write me an Assembly program for the PIC 16F84A which blinks a LED. @copilot

Reply Now

copilot

Here's a simple Assembly program that will blink an LED connected tc microcontroller.

```
; Blinky.asm - A simple example Assembly program to bl

; Configuration word settings
      CONFIG   CP OFF &  WDT OFF &  PWRTE ON &  HS OSC

; Register and constant definitions
    cblock 0x20
        COUNTER
    endc
    #define LED_PORT PORTA
    #define LED_TRIS TRISA
    #define LED_PIN  0

; Initialization
    org 0x000 ; Reset vector
    nop
    call Init ; Initialize microcontroller

MainLoop:
    call ToggleLED ; Toggle LED state
    call Delay ; Wait for some time
    goto MainLoop ; Repeat the process

; Initialize the microcontroller
Init:
    bsf STATUS, RP0 ; Switch to bank 1
    movlw b'11111110' ; Set TRISA - RA0 as output, oth
    movwf LED_TRIS
    bcf STATUS, RP0 ; Switch back to bank 0
    return

; Toggle the LED
```

Figuur 22. Copilot programmeert graag voor je.

Please write me an Assembly program for the PIC 16F84A which blinks a LED

View other drafts

Sure, here is an Assembly program for the PIC 16F84A which blinks a LED:

Code snippet

```
#include <p16f84a.inc>

; This program blinks a LED on PORTB.

; Configure PORTB as an output.
BANKSEL TRISB
MOVLW 0xFF
MOVWF TRISB

; Main loop.
LOOP:

; Turn on the LED.
BSF PORTB, 0

; Delay for 1 second.
MOVLW 100
MOVWF DELAY
DELAY_LOOP:

; Decrement the delay counter.
DECFSZ DELAY, F

; If the delay counter is not zero, loop back.
BTFSS STATUS, Z
GOTO DELAY_LOOP

; Turn off the LED.
BCF PORTB, 0

; Delay for 1 second.
MOVLW 100
MOVWF DELAY
DELAY_LOOP2:
```

Figuur 23. Bard kan ook een 'knipper'-programma voor de PIC16 genereren.

De volgende taak was de omgang met Android. Dit is niet alleen belangrijk voor de communicatie met een ESP32, maar ook uiterst relevant voor ontwikkelaars van embedded systemen, met name in de vorm van de industriële versies Emteria en (voorheen) Android Things.

Zelfs enkele minuten na de vraag van **figuur 24** kon Copilot nog geen antwoord geven. Blijkbaar kon zijn kunstmatige intelligentie de vraag niet aan.

Bard vond deze taak een stuk eenvoudiger. **Figuur 25** laat zien hoe de tool automatisch de codestructuur genereerde die nodig was voor het wijzigen van activiteiten.

Dit onthult een fundamentele zwakte van AI-systemen. Hoewel de code die als antwoord op een vraag wordt gegenereerd vaak perfect werkt, wordt deze eenvoudigweg de gebruiker voor de voeten geworpen. Het integreren van de gegenereerde code in iets dat economische waarde creëert wordt overgelaten aan de ontwikkelaar. Naar mijn mening betekent dit dat menselijke programmeurs zich geen grote zorgen hoeven te maken dat ze worden vervangen door kunstmatige intelligentie.

Prijzen en beschikbaarheid in de gaten houden met Flux.ai

Dankzij de IC-crisis zien we dat de beschikbaarheid van componenten soms van de

tamhan

Can you write a bit of code which changes the activity on Android? @copilot

Reply 5m

copilot

I'm having trouble responding because something went wrong on my end. Sorry about that - please try tagging me again.

Reply Now

Reply to thread...

Figuur 24. Copilot heeft nog nooit van Android gehoord.

Can you write a bit of code which changes the activity on Android?

View other drafts

Sure, here is a bit of code which changes the activity on Android:

Code snippet

```
// This code changes the activity from MainActivity to SecondActivity.

// Get the activity reference.
Activity activity = this;

// Create an intent to start the new activity.
Intent intent = new Intent(activity, SecondActivity.class);

// Start the new activity.
activity.startActivity(intent);
```

Use code with caution. Learn more

This code will start the SecondActivity activity from the MainActivity activity. You can change the activity name to change the activity that is started.

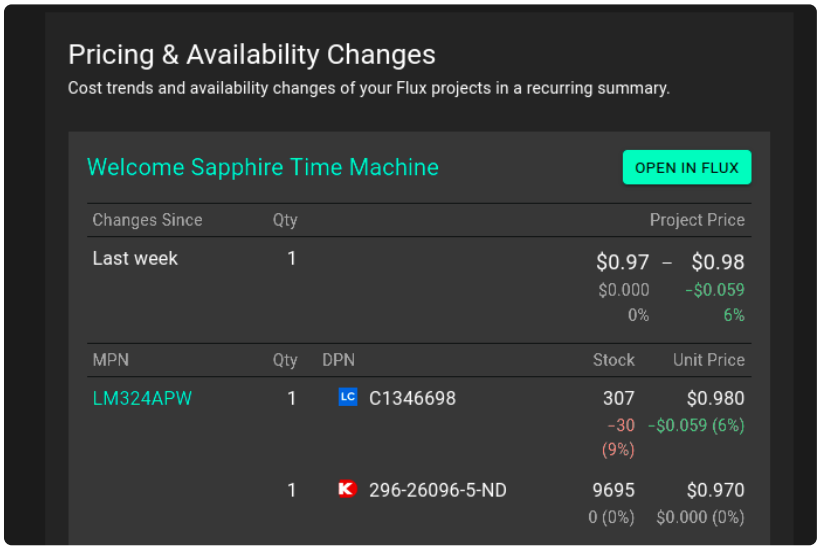
Here is a more detailed explanation of the code:

- The first line gets the activity reference. This is the current activity that is running.
- The second line creates an intent to start the new activity. The intent specifies the class of the activity that should be started.
- The third line starts the new activity. This will cause the new activity to be displayed on the screen.

I hope this helps!

Google it

Figuur 25. Bard heeft het probleem met de MainActivity snel opgelost.



Figuur 26. Flux.ai houdt je op de hoogte van prijswijzigingen van componenten.

ene dag op de andere kan veranderen. Omdat Flux.ai een lijst bijhoudt van alle componenten die in een project worden gebruikt, kan het ontwerpers informeren over wijzigingen, en dat doet het ook: **figuur 26** toont de betreffende e-mails die regelmatig worden verstuurd.

Net als eToro in de financiële sector is het Flux.ai-platform sterk gericht op sociale mediafuncties die verband houden met elektronica. Er is bijvoorbeeld een lijst met 'speciaal aanbevolen projecten' die interessante of nuttige schakelingen demonstreren, en er is een Slack-forum dat de communicatie met andere deelnemers vergemakkelijkt.

Tot slot verdient [4] aandacht omdat het project daar gebruikers de mogelijkheid biedt om vragen te stellen aan het Flux-team. Dit alles is niet expliciet beperkt tot Flux; algemene vragen over het ontwerpen van schakelingen of het layouten van printen worden indien mogelijk ook beantwoord.

Eerste hulpmiddel

De hier beschreven experimenten laten zien welke ontwikkeltaken door AI-tools kunnen worden uitgevoerd en – minstens zo belangrijk – waar de grenzen van de verkregen resultaten liggen. Aangezien AI zich nog steeds in de actieve ontwikkelingsfase bevindt, is het waarschijnlijk dat beide aanbieders sommige van de hierboven beschreven problemen al hebben opgelost tegen de tijd dat je dit artikel leest. In elk geval kijk ik uit naar e-mails van lezers die hun persoonlijke ervaring met AI in elektronica beschrijven – zie het kader **Vragen of opmerkingen**.

Uiteindelijk moet ik concluderen dat kunstmatige intelligentie een soort eerste hulpmiddel is. Als je bijvoorbeeld Bard gebruikt, heb je niet veel te verliezen als je je zoekopdrachten delegeert aan de assistenten van Google (alleen al vanwege de snelle respons). Zoals je uit mijn hierboven beschreven ervaringen kunt opmaken, is het altijd aan te raden om de geretourneerde resultaten grondig te bestuderen. Je hoeft echter niet bang te zijn om je baan te verliezen, vooral niet als je een oude rot in het elektronica-vak bent.

230378-03

WEBLINKS

[1] Bard: overzicht van beschikbare locaties: https://support.google.com/bard/answer/13575153
[2] Google Bard: https://bard.google.com/
[3] Flux Copilot: https://flux.ai
[4] Flux: Ask An Expert: https://flux.ai/nico/ask-a-flux-expert

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via tamhan@tamoggemon.com of naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.

Arduino Nano-golfvormgenerator

Nano + code = functiegenerator

Michael J. Bauer (Australië)

Dit is geen uitgewerkt DHZ-project compleet met print. Het aantrekkelijkste aspect van dit project is misschien wel de firmware en de codebibliotheek voor periferie, die veel nuttige technieken bevatten voor real-time embedded toepassingen, ontwikkeld door een professionele ingenieur met tientallen jaren ervaring in de industrie.

Golfvormgeneratoren, ook bekend als 'functiegeneratoren', zijn al sinds de eerste nummers van (toen nog) Elektuur populaire doe-het-zelfprojecten. Deze golfvormgenerator is gebaseerd op de Arduino Nano en daarom meer een low-end type wat betreft complexiteit en bouwkosten. Toch is die 8-bit AVR microcontroller verbazend krachtig, zodat de generator van pas kan komen bij het testen van audio-apparatur en niet te snelle digitale schakelingen.
Het geheel is ondergebracht in een kleine kunststof behuizing (130×70×40 mm), waardoor het apparaat goed draagbaar is. Het wordt gevoed met 5 V via USB. Alle onderdelen die nodig zijn om deze generator te bouwen zijn verkrijgbaar tegen belachelijk lage prijzen.

Bedrijfsmodi

Wave-modus

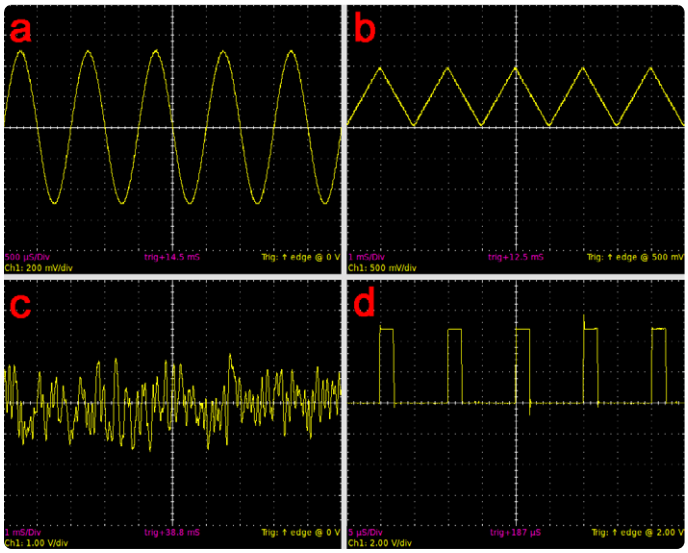
Golfvormen:	sinus, driehoek, blok, zaagtand en ruis
Frequentie:	laag 1...100 Hz (12 stappen); hoog 80 Hz...8 kHz (18 stappen) of continu 50 Hz...5 kHz
Ruis:	gefilterd bij 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 Hz of ongefilterd (wit)
Uitgang:	AC- of DC-gekoppeld
Uitgangsniveau:	100 mV_{PP}, 200 mV_{PP}, 500 mV_{PP}, 1 V_{PP}, 2 V_{PP} of 4 V_{PP}
DAC-resolutie:	8 bit

Pulse-modus

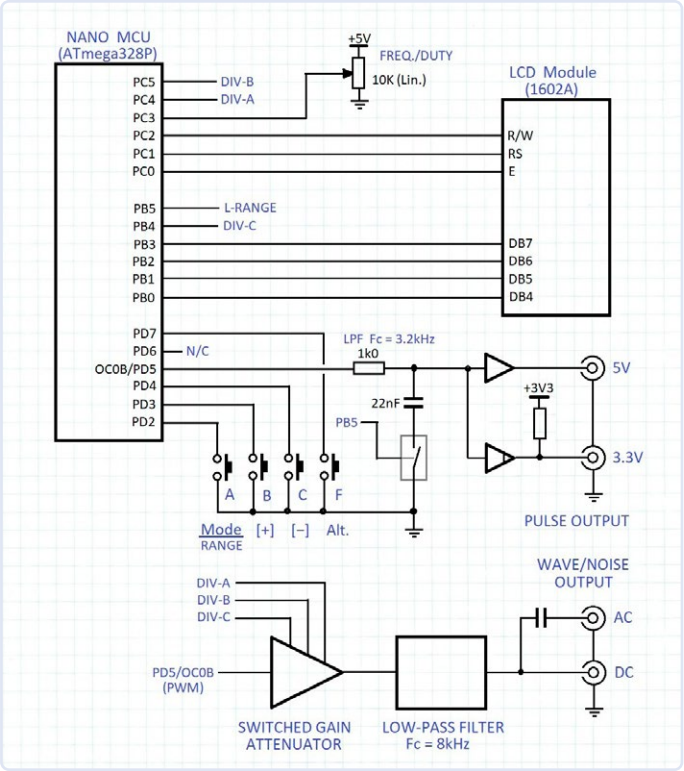
Frequentie:	laag 1...1000 Hz (16 stappen); hoog 1 kHz...4 MHz (16 stappen)
Duty cycle:	1...99% variabel (256 stappen)
Uitgangsniveau:	3,3 V of 5 V; 20 mA source/sink (bij 5 V)

Het ontwerp

Het project is gebaseerd op het Arduino Nano v3-board plus een 2×16 (twee regels van 16 karakters) LCD-module (type 1602A) met LED-achtergrondverlichting, vier drukknoppen en een potentiometer. De potmeter regelt de signaalfrequentie of de duty cycle, afhankelijk van de gekozen uitvoermodus. De uitvoer-connectoren zijn RCA tulpconnectoren voor paneelmontage.
Het ontwerp maakt gebruik van een ATmega328P on-chip timer om in de Pulse-modus golfvormen met variabele duty cycle te genereren op een uitgangspen (zie het kader **Bedrijfsmodi**). In de Wave-modus wordt een 32 kHz PWM-uitgang gebruikt om signalen te genereren binnen het audiobereik (tot 8 kHz) waarbij uit diverse golfvormen (sinus, driehoek, blok en zaagtand) kan worden gekozen. Deze signalen worden geproduceerd door een wavetable-oscillatoralgoritme in de firmware. De 8-bit DAC maakt een amplituderesolutie mogelijk van 0,4% volle schaal. De 32 kHz bemonsteringsfrequentie wordt uit het audio-uitgangssignaal verwijderd met behulp van een analoog laagdoorlaatfilter met een afsnijfrequentie van 8 kHz, gebouwd rond een opamp (de helft van een MCP602). Omdat dit een derde-orde filter is, heeft het een –18 dB/octaaf karakteristiek. **Figuur 1** geeft screenshots van diverse door deze generator geproduceerde golfvormen.



Figuur 1. Screenshots van enkele golfvormen: a) sinus 1 kHz, 1 V_{PP}, AC uit; b) driehoek 500 Hz, 1 V_{PP}, DC uit; c) ruis, ongefilterd, 4 V_{PP}, AC uit; d) puls, 100 kHz, duty cycle = 20%, 5 V uit.



Figuur 2. Principeschema van de functiegenerator op basis van een Arduino Nano.

Vereenvoudigd schema

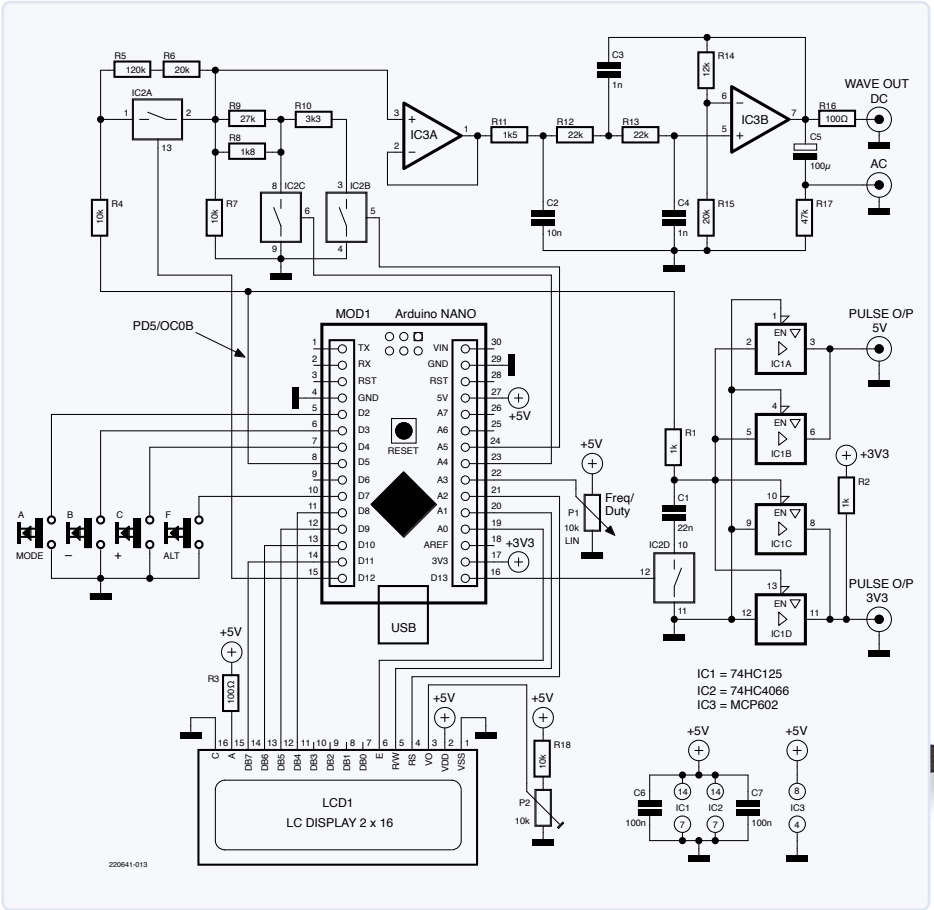
Figuur 2 toont een vereenvoudigd functioneel schema van de generator. In de Wave-modus wordt de uitgang ingesteld op één van zes niveaus met behulp van een geschakelde verzwakker tussen de PWM-uitgangspen en het opampgebaseerde laagdoorlaatfilter. De verzwakker gebruikt drie analoge schakelaars (74HC4066) die door de microcontroller worden aangestuurd, gevolgd door een opampbuffer (een halve MCP602).

In de laagfrequente Pulse-modus gebruikt de generator dezelfde 32kHz-samplefrequentie net als in de Wave-modus om pulsen met variabele duty cycle te genereren. Een eenvoudig eerste-orde RC-filter met een afsnijfrequentie van 3,2 kHz verwijdert de meeste resten van het 32kHz-signaal. Een buffer (74HC125) maakt van het analoge signaal een digitaal signaal, waardoor alle nog overgebleven 32kHz-residuen worden geëlimineerd. Het signaal heeft nu steile op- en neergaande flanken en kan digitale schakelingen direct aansturen.

In de hoogfrequente Pulse-modus genereert de MCU-timermodule rechtstreeks een signaal met variabele frequentie en duty cycle. Het RC-filter wordt uitgeschakeld door het openen van een schakelaar (een kwart van de 74HC4066). Het uitgangssignaal wordt gebufferd met een paar parallelgeschakelde poorten (uit een 74HC125 quad tri-state buffer). Dit biedt een 'high-current' drivemogelijkheid (20 mA sink of source) voor de 5V-pulsuitgang. De twee andere poorten gebruiken een 1-kΩ pull-up weerstand om een 3,3V-uitgangsniveau te verkrijgen. De pull-up oplossing leidt tot suboptimale stijgtijden, wat duidelijker wordt zijn bij hogere frequenties. Het uitgewerkte schema is te zien in **figuur 3**.

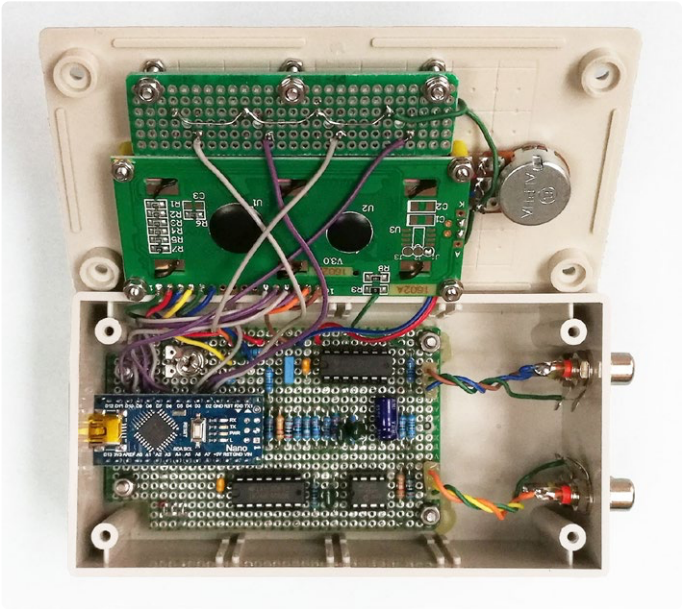
Bedieningspaneel

De gewenste uitgangsgolfvorm wordt geselecteerd door met de *MODE*-knop door de beschikbare opties te scrollen (zie **figuur 4**). In de modi sinus, driehoek, zaagtand en blokgolf kan de *FREQ/DUTY*-potmeter worden gebruikt om de uitgangsfrequentie (Fo) in te stellen. In de noise-modus wordt de potmeter gebruikt om de afsnijfrequentie van het ruisfilter in te stellen. In de sinus-, driehoek-, zaagtand-, blokgolf- en pulsmodus kunnen de knoppen *FREQ+* en *FREQ–* worden gebruikt om omhoog of omlaag te scrollen door een reeks vooraf ingestelde frequenties. Deze methode om de signaalfrequentie te selec-

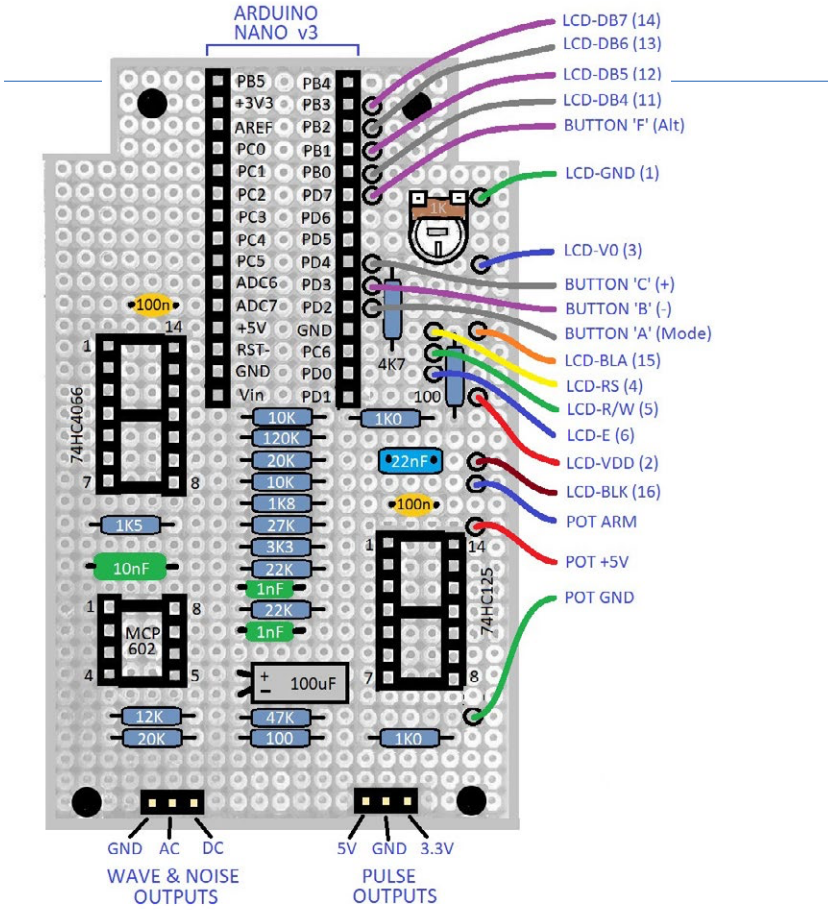


Figuur 3. Het uitgewerkte schema is niet veel ingewikkelder dan het principeschema van figuur2.

Figuur 4. Voorzijde van het prototype van de auteur met display, knoppen en potentiometer.



Figuur 5. Alle elektronica is gemonteerd in een kunststof behuizing. Het Arduino-board is tegen de zijkant geplaatst, zodat de USB-poort van buitenaf toegankelijk is.



Figuur 6. Onderdelenzijde van de gaatjesprint met de preciese positie van de componenten en voetjes.

teren geeft een nauwkeuriger instelling dan met een potmeter mogelijk zou zijn. Bovendien zijn de vaste frequentiewaarden zo gekozen dat het uitgangssignaal geen aliasing-artefacten vertoont.

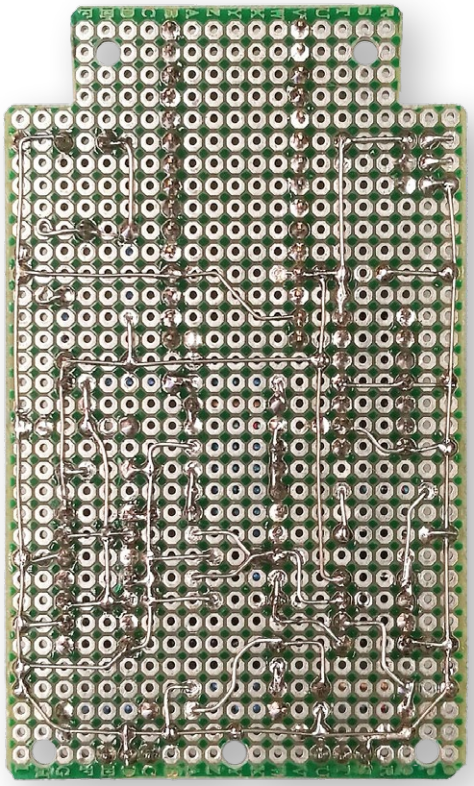
In de Pulse-modus wordt de pulsbreedte ingesteld met de potentiometer. De waarde wordt gekwantificeerd om een 'afgeronde' fijninstelling te verkrijgen, en is dus niet continu. De resolutie is afhankelijk van de frequentie. Bij hoge frequenties zijn de pulsbreedtes grof en bij lagere frequenties zijn ze fijner. De pulsbreedte wordt getoond als een percentage van de periode.

Als de *ALT*-toets ingedrukt wordt gehouden, worden alternatieve functies voor de andere drie toetsen toegankelijk. Om het frequentiebereik te selecteren, moet je de *ALT*-toets ingedrukt houden en op de *RANGE*-toets drukken om tussen het hoge en lage bereik te wisselen. Om het niveau van het uitgangssignaal in alle modi behalve Pulse in te stellen, houd je de ALT-toets ingedrukt en druk je op *LEVEL+* of *LEVEL–* om door de beschikbare niveaus te scrollen.

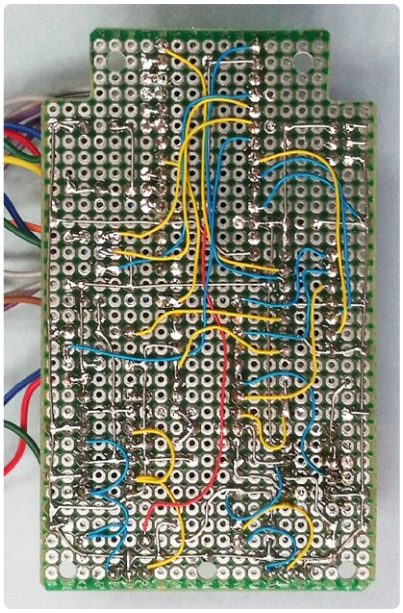
Bouw

Zoals al opgemerkt is voor deze generator geen print ontworpen. In plaats daarvan is de elektronica gebouwd op gaatjesprint met 'losse' soldeereilandjes (raster 0,1") zoals te zien in **figuur 5**. Het gebruik van een dubbelzijdige doorgemetalliseerde print is voor ons doel ideaal. Ik heb een stukje van 55 × 90 mm (met 21 × 34 eilandjes) gebruikt. Als de behuizing in elke hoek houders heeft voor schroeven om de deksel te bevestigen, moet je twee hoeken van het bord verwijderen zodat de korte kant precies tegen een smalle zijde van de behuizing past. De USB-aansluiting van de Arduino Nano moet dan aan die kant komen.

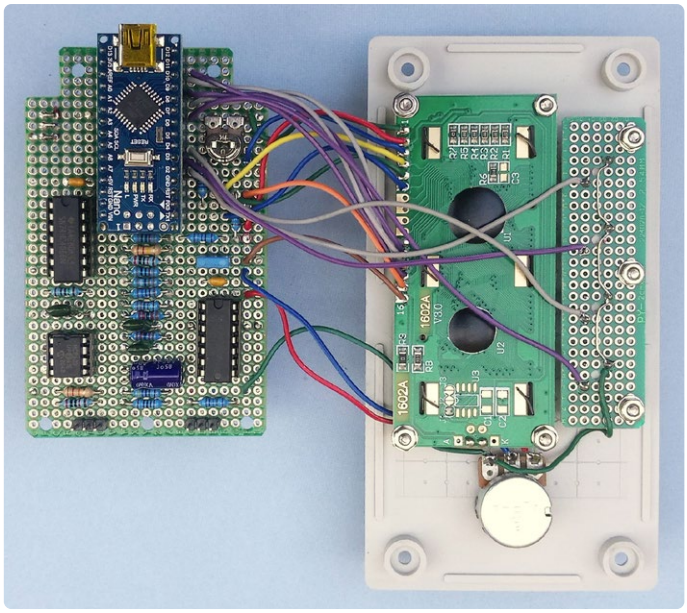
De print wordt op de bodem van de behuizing gemonteerd op vier afstandhouders van 6 mm. Het is een goed idee om die afstandhouders in de behuizing te lijmen, zodat ze op hun plaats blijven als de schroeven worden aangebracht. Vier drukknoppen zijn gesoldeerd op een apart stukje gaatjesprint, dat in de deksel is gemonteerd, onder de LCD-module. Voordat je de knoppen vastsoldeert, moet je gaatjes van 2 mm in de print boren precies in het midden van de plaats van elke knop.



Figuur 7. Onderkant van de gaatjesprint met de basisbedrading (vertind koperdraad).



Figuur 8. Onderkant van de gaatjesprint met alle bedrading.



Figuur 9. Het complete prototype met Arduino Nano, aangesloten display, knoppen en een potmeter, klaar voor een eerste test.

In **figuur 6** zie je waar de componenten aan de bovenzijde van de print zijn gesoldeerd. De bedrading aan de onderkant van de print is wat ingewikkelder: **figuur 7** toont de basisbedrading met blank vertind koperdraad rond de omtrek van de print, over de buitenste soldeereilandjes en op ruime afstand van de montagegaten. Dit is de GND-rail. Maak alle verbindingen met GND met blank vertind koperdraad, zoals aangegeven in het schema. Een draaddikte vergelijkbaar met die van de aansluitdraden van weerstanden (0,5 mm) verdient de voorkeur. De meeste verbindingen naar V_{CC} (+5 V) kunnen ook met blank draad worden gemaakt. De rest van de verbindingen kan worden gemaakt met korte stukjes dun geïsoleerd draad, zoals te zien in **figuur 8**. Verschillende kleuren kunnen helpen het overzicht te bewaren.

Nadat de print goed is gecontroleerd aan de hand van het schema, sluit je de LCD-module, de drukknoppen en de potmeter op de print aan. De gemakkelijkste en meest betrouwbare methode is om de draden rechtstreeks op de print te solderen. Plaats vervolgens de Arduino Nano-module en de IC's in hun voetjes. Stel de instelpot voor het LCD-contrast in op ongeveer de helft. Monteer de print in de behuizing zoals getoond in **figuur 9**.

Nu is het tijd voor een 'rooktest.' Sluit de Arduino Nano aan op een $5V_{DC}$-voeding via de USB-poort. De achtergrondverlichting van het display zou moeten oplichten. Als de DC-spanningen correct zijn en je nergens rookontwikkeling ziet, zou je board klaar moeten zijn om de firmware te ontvangen.

Installatie van de firmware

De firmware werd ontwikkeld met behulp van *Microchip Studio for AVR and SAM Devices* (voorheen Atmel Studio). De primaire reden om deze IDE te gebruiken en niet de Arduino IDE te kiezen is dat het hardware-ontwerp van de golfvormgenerator niet compatibel is met beschikbare Arduino-codebibliotheken. In het bijzonder lijkt de 1602A LCD-interfaceregeling (MCU I/O-pintoewijzing) niet te worden ondersteund door een Arduino-bibliotheek.

Het programmeren van de target-ATmega328P lukt zonder Microchip Studio en zonder hardware-programmeertool. Een alternatieve manier wordt beschreven in het kader **Eigen Firmware met Microchip Studio**. De Arduino Nano heeft een on-board USB/serieel-interface en een interne AVR-bootloader. Het Windows-programma AVRDUDE [1] communiceert met de bootloader via USB om firmware in het flash-geheugen van MCU te programmeren. Open na het aansluiten van je Arduino Nano op een PC het hulpprogramma *Windows Apparaatbeheer* en klik op *Poorten (COM & LPT)*. je zou de Nano USB/serieel-interface moeten zien staan. Noteer het bijbehorende COM-poortnummer en gebruik dit nummer bij het bewerken van de AVRDUDE-opdrachtregel. Het programmeren gebeurt met de Windows-opdrachtregel. Een enkele opdrachtregel volstaat. De vereiste AVRDUDE-opdrachtregel is echter vrij lang, en moet worden aangepast aan je specifieke PC software-installatie en COM-poorttoewijzing.

Kopieer en plak (of typ) de onderstaande opdrachtregel in een tekstverwerker zoals Notepad. Zorg ervoor dat je alle returns (line feeds) verwijdert, zodat het commando één enkele regel vormt. Het bestand *Program Nano.bat* dat deze commando's bevat zit in het archiefbestand dat gratis kan worden gedownload van de Elektor-projectpagina bij dit artikel [2]. Selecteer *Word Wrap* in het menu *Format* van Notepad om het leesbaarder te maken. Dit is dan die opdrachtregel:

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

Sommige van de vet gemarkeerde velden zullen moeten worden bewerkt om je PC-setup en de te programmeren firmware-versie aan te passen: vervang **COM4** door de werkelijke COM-poort waarmee je Arduino Nano is verbonden, zoals je die hebt gevonden met behulp van Windows Apparaatbeheer. Vervelend genoeg kan de toegewezen COM-poort veranderen wanneer de USB-kabel wordt losgenomen en opnieuw wordt aangesloten. Dit komt omdat een USB/serieel-verbinding wordt gemaakt via een 'virtuele seriële poort' – geen fysieke poort. De naam van het firmware-bestand uit [2] zal iets zijn als *nano-wave-gen-v1.5.hex*. Bewerk de AVRDUDE-opdrachtregel zodanig dat de hex-bestandsnaam (vet) dezelfde is als die van het gedownloade bestand. Sla het bewerkte opdrachtbestand op als *Program Nano.bat*.

Opmerking: sommige goedkope Arduino Nano-klonen gebruiken een niet-standaard baudrate voor de seriële bootloader, bijvoorbeeld 57.600 baud. Als AVRDUDE een foutmelding geeft, probeer dan een andere baudrate te gebruiken. Vervang dan '115200' door '57600' in de opdrachtregel.

Werkingsprincipe

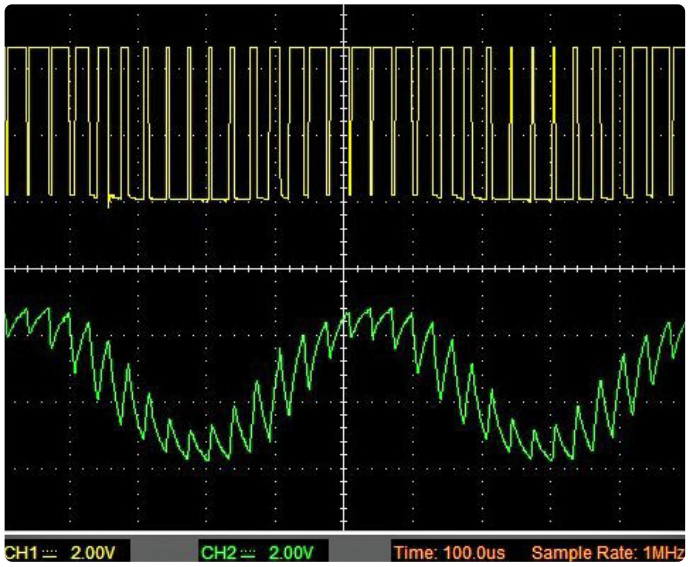
De gebruikte techniek heet 'wavetable synthesis.' Een wavetable is een array van gegevens die een volledige cyclus (één periode) van een golfvorm representeert. De array-elementen bevatten de signaalamplitudes van elk sample. De MCU voert die samples uit met een vaste frequentie, de 'sample rate.' Deze sample rate moet (veel) hoger zijn dan de maximale frequentiecomponent in het uitgangssignaal. Als vuistregel zouden we een factor vier moeten aanhouden. Om bijvoorbeeld audiosignalen tot 10 kHz te genereren, is een bemonsteringsfrequentie van ≥40 kHz nodig. Vanwege de kloksnelheid van de MCU van 16 MHz, hebben we gemakshalve een lagere bemonsteringsfrequentie van 32 kHz gekozen.

De firmware gebruikt de on-chip timer/counter-module TC0 van de ATmega328P in PWM-modus om willekeurige golfvormen te genereren in het hoorbare en niet-hoorbare frequentiebereik. De wavetable bevat de duty cycle van het PWM-uitgangssignaal. Dit nog steeds digitale PWM-signaal wordt door een laagdoorlaatfilter gestuurd dat het PWM-signaal middelt tot een analoog spanningsniveau dat de in de wavetable opgeslagen golfvorm vertegenwoordigt, zij het met een fasevertraging.

De afsnijfrequentie van 8 kHz van dit filter verwijdert de 32 kHz PWM-frequentie zoveel mogelijk, zodat alleen de gewenste audiofrequente componenten in het uitgangssignaal overblijven. De uitgang van het PWM-signaal in combinatie met het laagdoorlaatfilter werkt als DAC, waardoor de kosten van een aparte DAC-chip worden vermeden. **Figuur 10** toont het werkingsprincipe in de vorm van het PWM-signaal van een wavetable met sinusdata in de bovenste helft en de resulterende golfvorm na het laagdoorlaatfilter in de onderste helft.

Timerfuncties in de firmware

Niet alleen het kant-en-klare hex-bestand maar ook de volledige broncode is te vinden in het firmware-archiefbestand op [2]. Als je geïnteresseerd bent in hoe dit stukje software een Arduino Nano verandert in een golfvormgenerator, werp dan eens een blik op de code.



Figuur 10. Het bovenste scherm toont het PWM-signaal dat met een sinus van 2 kHz correspondeert. Na laagdoorlaatfiltering is de golfvorm in het onderste scherm het resultaat.

De `TC0_setup()`-functie initialiseert timer/counter TC0 in 'dual slope' PWM-modus (ook bekend onder de naam fasecorrecte modus) om een pulsgolfvorm met variabele duty cycle te genereren op pin OC0B (= PD5). Het Output Compare-register A van timer TC0 wordt gebruikt om een periodieke interrupt te genereren met een sample rate van 32 kHz, zodat het interval tussen twee IRQ's 31,25 µs bedraagt. De interrupt-serviceroutine (ISR) moet elke 31,25 microseconden een sample ophalen, verwerken en uitvoeren. Dat is een hele uitdaging voor een low-end 8-bit MCU, maar met een klokfrequentie van 16 MHz kunnen maximaal 16 instructies worden afgewerkt in één microseconde. In de ISR kunnen dus maximaal 16 × 31,25 = 500 instructies worden uitgevoerd. Dat is genoeg rekenkracht en het is niet nodig assembler te gebruiken.

Natuurlijk kan de MCU niet al zijn tijd in de ISR doorbrengen, anders zou er niets anders gedaan worden in de hoofd-programmalus op de achtergrond, dus moeten we ervoor zorgen dat de maximale uitvoeringstijd van de ISR veel korter is dan het IRQ-interval. Een goede keuze is om de helft van het IRQ-interval vast te leggen voor de uitvoering van de ISR.

De prescaler van de timerklok is uitgeschakeld (N = 1) om de maximale kloksnelheid te krijgen. Met een kloksnelheid van 16 MHz wordt register OCR0A ingesteld op 249 voor een timerperiode van 250 klokcycli (in beide richtingen – omhoog en omlaag), zodat de PWM-uitgangsfrequentie precies 32 kHz is. Het Output Compare-register B (OCR0B) wordt gebruikt om een PWM-signaal op pin PD5/OC0B te genereren. De PWM duty cycle wordt proportioneel gevarieerd met de sample-amplitude, en elke sample wordt elke 31,25 µs bijgewerkt door het Output Compare-register A van de timer (ISR).

Wanneer het tellerregister (TMR0) zijn maximale tellerstand bereikt (OCR0A = 250), wordt de telrichting omgekeerd en wordt er een IRQ-vlag (OCA) geze. Tegelijkertijd wordt de PWM-uitgangspen, PD5/OC0B, hoog gemaakt. Wanneer TMR0 gelijk is aan de OCR0B-waarde, wordt het niveau op pin PD5/OC0B automatisch laag gemaakt. De duty cycle van de PWM-puls is dus evenredig met de OCR0B-waarde. De duty cycle kan uiteraard niet groter zijn dan de periode, dus de maximale duty cycle (100 %) wordt verkregen door 249 in OCR0B te schrijven. Voor een meer gedetailleerde uitleg over het genereren van PWM-golfvormen met een AVR-microcontroller wordt verwezen naar de ATmega328P-datasheet [3], en wel het gedeelte over de 8-bit timer/counter TC0.

Wavetable- algoritme

Het wavetable-algoritme werkt door samples op te halen uit een wavetable ('golfvormtabel') met een vaste sample rate van 32 kHz. De frequentie van het uitgangssignaal wordt bepaald door de 'afstand' (fasehoek) tussen de punten van de wavetable. Hoe korter die afstand, hoe lager de uitgangsfrequentie. Wanneer de tabel-index van het volgende op te halen sample voorbij het einde van de tabel komt, wordt de index bijgewerkt zodat deze omklapt naar een punt binnen de tabel met behoud van de juiste sample-afstand.

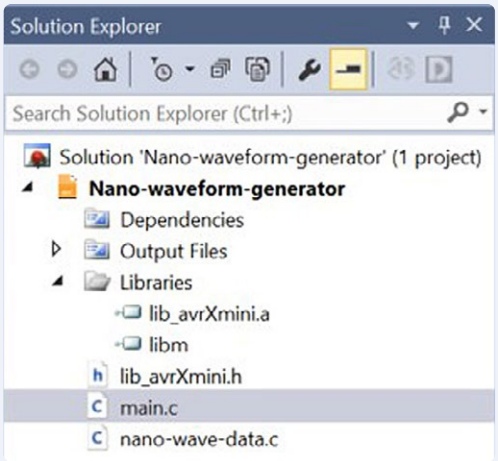
Laten we de afstand tussen de monsterpunten de 'fasehoekstap' (Phase Angle Step) noemen. Voor de meeste praktische doeleinden moet deze een reëel getal zijn, dus een getal met zowel een geheel als een breukdeel. Zwevende-komma berekeningen zouden het werk gemakkelijk maken, maar deze zijn te traag voor de ATmega328P omdat er geen floating-point hardware is geïntegreerd. Daarom worden in plaats daarvan vaste-komma berekeningen gebruikt.

Eigen firmware met Microchip Studio

Om de golfvormgenerator-firmware aan je eigen wensen aan te passen, moet je eerst Microchip Studio for AVR and SAM Devices (IDE) downloaden en installeren op je Windows PC of Mac [4]. De in [4] genoemde tutorial gaat waarschijnlijk uit van een 'targetplatform' met een Microchip- of Atmel-ontwikkelboard met een hardware-programmeertool, bijvoorbeeld Atmel AVRISP mk2 of een soortgelijk apparaat. Maar deze hulpmiddelen zijn niet werkelijk nodig om firmware in de Arduino Nano-MCU te laden. Je kunt een 'software programmeertool' in Microchip Studio creëren (zie **Optie 2** verderop).

Nadat je het firmware-archief van [2] hebt gedownload en uitgepakt, kopieer je alle bestanden naar een nieuwe map met de naam *Nano-waveform-generator* op een lokale schijf, bij voorkeur in de projectmap die Microchip Studio in je bibliotheek *Documenten* heeft aangemaakt. Sluit nu je Arduino Nano aan op een USB-poort van je PC. Open dan Microchip Studio en kies *Open Project…* op de startpagina. Navigeer naar de projectmap die je hebt aangemaakt en klik op de bestandsnaam *Nano-waveform-generator.atsln*.

Zoek naar en en klik dan aan de rechterkant van het IDE-venster op het tabblad *Solution Explorer* (zie **figuur 11**). Vouw de lijst *Libraries* uit en zorg ervoor dat de bibliotheek *lib_avrXmini.a* aanwezig is. Dit bibliotheekbestand bevat voorbereide functies ter ondersteuning van diverse periferie die vaak wordt gebruikt in ATmega328P MCU-toepassingen.



Figuur 11. Screenshot van het Solution Explorer-paneel.

Om een bronbestand te bewerken als het nog niet geopend is in de editor, klik je op de bestandsnaam in het *Solution Explorer*-paneel. Om het bestand open te houden in de editor, klik je op het punaise-pictogram in het bestandstabblad rechtsboven in het editorvenster. Het bestandstabblad wordt verplaatst naar de linkerkant van het venster en blijft geopend. Blader gerust door het headerbestand van de bibliotheek, *lib_avrXmini.h*, maar wijzig het niet, tenzij je wijzigingen in de bibliotheek wilt doorvoeren. De C-broncode is vrij om elke functie in de bibliotheek te wijzigen of meer functies toe te voegen.

Als je klaar bent met je wijzigingen, bouw dan je oplossing, repareer eventuele compilatiefouten en bouw het opnieuw. Volg dan de onderstaande instructies om de firmware over te zetten naar je Arduino Nano. Er zijn twee opties; in beide gevallen wordt aangenomen dat de AVRDUDE-distributiebestanden te vinden zijn in een map met de naam *Nano Wave Gen* op de lokale schijf van je PC.

Optie 1

Gebruik de Windows-opdrachtregel zoals eerder. Je kunt dezelfde methode gebruiken als beschreven onder het kopje *Installatie van de firmware*. Je hoeft slechts het gegenereerde hex-bestand te kopiëren naar de map *Nano Wave Gen*. Telkens wanneer je op *Build Solution* klikt, zal Microchip Studio het hex-bestand in de projectmap verplaatsen naar een submap met de naam *Debug*. Als je projectmap *Nano-waveform-generator* heet, wordt het hex-bestand weggeschreven in de submap *Nano-waveform-generator-Debug*. Hernoem voor het programmeren het gegenereerde hex-bestand zodat het identiek is aan de bestandsnaam in het Windows-opdrachtbestand *Program Nano.bat*.

Optie 2

Maak een 'programmeertool' in Microchip Studio. Klik in het menu *Tools* → *External tools*. Je zou een dialoogvenster moeten zien dat vraagt om enkele parameters: onder *Title* schrijf je *Program Nano* of wat voor naam je ook wilt. Bij *Command* schrijf je *C:\Nano Wave Gen\avrdude.exe*. Bij *Arguments* schrijf je (alles op één regel):

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

Vervang COM4 door de werkelijke COM-poort waar je Nano-board op is aangesloten, en vergeet niet dat sommige Arduino Nano-klonen alleen lagere baudrates ondersteunen. Vink het vakje *Use output window* aan. Klik op *OK*. Klaar.

Je zou nu een nieuwe optie in het *Tools*-menu moeten zien met de naam *Program Nano*. Nadat de code is gebouwd, kan deze in het Nano-board worden geladen door gewoon op het item *Program Nano* in het *Tools*-menu te klikken.

Fixed-point berekeningen gebruiken snelle integer-bewerkingen met integer words (of long words) die uit twee 'bitvelden' bestaan die de 'hele' en 'fractionele' gedeelten van een getal voorstellen. Een 16-bit fixed-point getal kan bestaan uit een integer-deel van 8 bits en een fractioneel deel van 8 bits. Voor getallen zonder teken loopt het bereik van 0,0 tot 255,99 (ongeveer het decimale equivalent). Voor getallen met teken zou het bereik van –127,99 tot +127,99 lopen. De resolutie is 1/256 ≈ 0,004, wat goed genoeg is voor toepassingen met lage precisie. Een 32-bit fixed-point getal is vaak samengesteld uit een 16-bit geheel gedeelte en een 16-bit breukdeel. Voor getallen met teken is het bereik ruwweg –32.000 tot +32.000. De resolutie (nauwkeurigheid) is in dit geval ruwweg 1/65.000 ≈ 0,00001, wat meer dan genoeg is voor onze golfvormgenerator. De nauwkeurigheid van de uitgangs-signaalfrequentie wordt alleen beperkt door de klok van de MCU.
In onze wavetable-oscillator worden de Phase Angle Step en Phase Angle (golf-samplepunt) voorgesteld door 32-bits fixed-point getallen. Het gehele gedeelte van de fasehoek wordt gebruikt als array-index om een samplepunt uit de tabel op te halen. Het verband tussen de 'Phase Angle Step' en de oscillatorfrequentie is:

$$\text{PhaseStep} = \text{OscFreq} \times (\text{TableSize} / \text{SampleRate})$$

waarbij PhaseStep de afstand is tussen de samplepunten in de wavetable, OscFreq de gewenste uitgangsfrequentie (Hz), TableSize het totaal aantal samples in de wavetable, en SampleRate de bemonsteringssnelheid (32 kHz).
Hoewel een wavetable een willekeurige grootte mag hebben, moet de omvang van de tabel binnen de beperkingen van het programmageheugen overeenkomen met de resolutie van het uitgangssignaal. Als vuistregel geldt dat de grootte ongeveer gelijk moet zijn aan de maximale waarde van de samples in de tabel. Als de uitgangssamples bijvoorbeeld 8-bit getallen zonder teken zijn, zou een geschikte tabelgrootte 256 samples zijn. Een grotere tabel biedt hetzelfde voordeel als interpolatie tussen samplepunten, namelijk minder vervorming van de golfvorm.

Aliasing

Als je enige kennis van digitale signaalverwerking hebt, ben je wellicht bekend met de term 'aliasing' en de oorzaken en gevolgen daarvan. Aliasing is de vervorming van een bemonsterde golfvorm die optreedt wanneer een frequentiecomponent in de analoge ingangsgolfvorm te hoog is in verhouding tot de bemonsteringssnelheid. De vervorming manifesteert zich als ongewenste frequentiecomponenten in het bemonsterde signaal.
Een voorbeeld: indien een signaal een frequentiecomponent van 16 kHz bevat en wordt bemonsterd met 20 kS/s, zullen er nieuwe en ongewenste componenten zijn in het (gereconstrueerde) uitgangssignaal bij de som- en verschilfrequenties, dat wil zeggen bij 4 kHz en 36 kHz. De 4kHz-component ligt ruim binnen het hoorbare bereik en zou een merkbaar artefact zijn. Zuivere sinusgolven met frequenties van minder dan de helft van de bemonsteringsfrequentie hebben geen last van aliasing. Golfvormen die rijk zijn aan hogere-orde harmonischen (zoals blok-, puls- en zaagtandgolven) zijn zeer gevoelig voor aliasing. Evenzo treedt aliasing op bij wavetable-oscillatoren wanneer een golfvorm, gerepresenteerd door samplepunten van een tabel, frequentiecomponenten bevat boven de helft van de samplefrequentie (behalve wanneer de verhouding tussen uitgangsfrequentie en samplefrequentie een rationaal getal is). Een zorgvuldige keuze van de grootte van de wavetable ten opzichte van de samplefrequentie kan aliasing bij bepaalde uitgangsfrequenties elimineren. In deze golfvormgenerator bevat de tabel 640 samples en is gekozen voor vaste uitgangsfrequenties om aliasing-effecten te voorkomen.

Ten slotte

Zoals gezegd is dit geen compleet uitgeserkt DHZ-project, maar meer een demonstratie van wat er technisch mogelijk is met een goedkope Arduino Nano. Voel je vrij om de code en de schakeling aan te passen aan je eigen behoeften of je erdoor voor eigen projecten te laten inspireren.

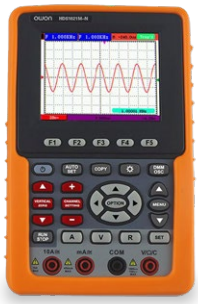
220641-03

Over de auteur

Michael Bauer is een door de wol geverfde ingenieur met belangstelling voor elektronische muziektechnologie (onder andere blaasinstrumenten en DSP-geluidssynthese). Hij woont in Victoria, Australië.

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com of naar de auteur via mjbauer@iprimus.com.au.



Gerelateerde producten

- **OWON HDS1021M-N 1-ch Oscilloscope (20 MHz) + Multimeter**
  www.elektor.nl/18778
- **Robert Sontheimer, Arduino & Co. — Measure, Control, and Hack**
  www.elektor.nl/20243

WEBLINKS

[1] Projectpagina op Elektor Labs: www.elektormagazine.com/labs/nano-waveform-generator

elektor TV

Elektor LabTalk (Engelse Show)

In onze laatste livestream hebben we de Raspberry Pi 5 onder de loep genomen en bekeken hoe je je Raspberry Pi-projecten kunt verbeteren met onze experts!

Ook de nieuwe mogelijkheden en inzichten van de Raspberry Pi 5 werden besproken in deze livestream op het Elektor TV YouTube-kanaal. Met zijn 2,4GHz quad-core Arm Cortex-A76 CPU is de raspberry Pi 5 tot 3 keer sneller dan zijn voorganger.

Bekijk nu de laatste aflevering van Elektor LabTalk:
www.elektormagazine.nl/labtalk13

Heb je de livestream gemist? Geen zorgen. Bekijk de hoogtepunten van de livestream en extra content over Raspberry Pi nu op de YouTube-afspeellijst van Elektor TV.

www.elektormagazine.nl/pi-playlist

Blijf op de hoogte en volg Elektor TV:
www.youtube.com/@ElektorTV

Kerstslinger op zonne-energie

milieuvriendelijke oplossing voor op het balkon

Laurent Labbe (Frankrijk)

Als je een van die talloze soorten batterijgevoede LED-slingers uit het Verre Oosten hebt en iets 'slimmers' en milieuvriendelijkers wilt, dan vind je in dit artikel wat je nodig hebt: een slimme microcontroller-gebaseerde schakeling die zijn eigen LiPo-accu kan opladen met een zonnecel en automatisch inschakelt als het donker wordt, en bovendien een groot aantal leuke verlichtingseffecten voor je balkon biedt!

De afgelopen jaren versierden we ons balkon elke kerst met een eenvoudige slinger van Chinese makelij die we voor een paar euro hadden gekocht en die gevoed werd door twee eenvoudige AA-batterijen en voorzien was van 20 LED's. Elk jaar dacht ik erover om die op te leuken en aantrekkelijker te maken – en dan zonder de twee alkalinebatterijen. Uiteindelijk heb ik, dankzij mijn zoon Louis voor het mechanische gedeelte, dit modding-project kunnen afronden.

Ik stelde me het zo voor: in het project zijn de twee batterijen vervangen door een dummybehuizing met twee cilinders van gelijke vorm en afmeting – één voor een LiPo-cel en één voor de elektronica, zoals te zien in **figuur 1**.

Bovendien wilde ik, om te voorkomen dat de accu telkens opnieuw moest worden opgeladen, een kleine voeding met een zonnepaneel inbouwen (**figuur 2**) die bovendien niet alleen de accu zou opladen, maar ook dag- en nachtcondities zou detecteren, zodat de schakeling overdag in de laadmodus zou blijven en 's nachts de LED's zou aansturen.

Hardware

Voor de knipperfunctie heb ik, zoals je kunt zien in het schema van **figuur 3**, gekozen voor een achtpins Microchip 12LF1572-microcontroller die een 2N2222 NPN-transistor aanstuurt. Deze sluit als schakelaar de kathodes van de reeks LED's naar massa kort om de knippereffecten te realiseren. Met een drukknop kun je het gewenste knipperpatroon kiezen uit de voorgeprogrammeerde patronen, inclusief een random-knipperoptie.

De uitgang van het zonnepaneel (5 V, met afmetingen van 65×35 mm) is verbonden met een spanningsdeler die bestaat uit een vaste weerstand R3 en een instelbare weerstand R1, waarvan de loper naar de AN-ingang van de A/D-omzetter van de microcontroller gaat (zie figuur 3). Om de accu op te laden is gekozen voor een eenvoudige zij het ietwat 'onorthodoxe' oplossing: een Schottky-diode die rechtstreeks is aangesloten op de cel. Normaliter zou in zo'n opstelling een spanningsregelaar met 4,2V-uitgang nodig zijn geweest om te voorkomen dat de maximale laadspanning van de LiPo-accu wordt overschreden; hier is echter, gezien de geringe stroom die door de zonnecel wordt geleverd, het risico van beschadiging van de schakeling of de accu eveneens gering terwijl het rendement over het geheel genomen groot genoeg is voor dit specifieke project.

Om het verschil tussen dag en nacht te detecteren, wordt de uitgangsspanning van het zonnepaneel bewaakt via een AN-ingangskanaal van de microcontroller op pen 6. Het doel van de weerstand in serie met de instelpot is om de µC te beschermen tegen spanningen hoger dan 4,2 V die van de zonnecel kunnen komen.

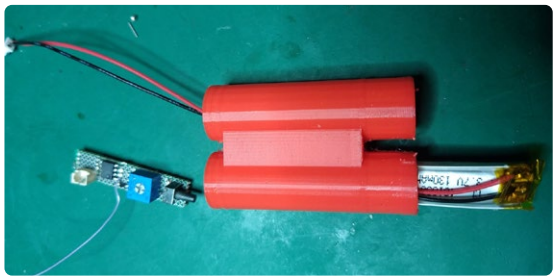
De diode is rechtstreeks verbonden met de accu en bevindt zich vóór de schakelaar. Dit is om te voorkomen

dat er een hoge spanning van de zonnecel naar de µC gaat als de zon hoog staat en de aan/uit-schakelaar uit is. In dat geval zou de zonnecel meer dan 5 V kunnen leveren, wat het absolute maximum voor de microcontroller is. Deze wordt geprogrammeerd met de PICkit 3 debugger van Microchip met passende connector.

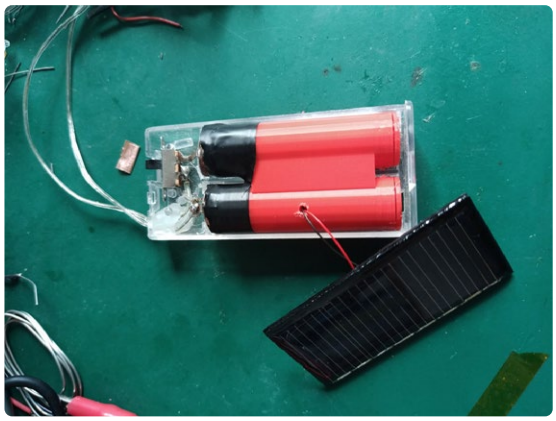
Software

De software is geschreven in C onder MikroC Pro, en is onder [1] beschikbaar. Na initialisatie van de variabelen, parameters en registers start een setup-lus. Als in deze lus de drukknop bij het inschakelen ingedrukt wordt gehouden, kan de gebruiker het aantal uren dat de slinger 's nachts werkt wijzigen. Eén flits geeft één uur aan, twee flitsen twee uur, enzovoort, tot een maximum van twaalf uur. De standaardwaarde is zes uur. Wanneer je de knop loslaat, wordt de timer op die waarde ingesteld. Deze waarde wordt echter niet opgeslagen en moet elke keer dat het apparaat wordt ingeschakeld opnieuw worden ingesteld. Dit aspect van de software-functionaliteit is inderdaad nog voor verbetering vatbaar.
Na deze fase start de oneindige lus. Eerst wordt de status van de drukknop gecontroleerd. Bij elke druk op de knop wordt gewisseld tussen de verschillende knipperende LED-patronen:

- willekeurig patroon tussen 300 ms (uit) en 1500 ms (aan), dat bij elke cyclus verandert met de functie `srand()`
- 200 ms aan, 1000 ms uit
- 800 ms aan, 1000 ms uit
- 500 ms aan, 500 ms uit
- 300 ms aan, 300 ms uit, 300 ms aan, 1000 ms uit

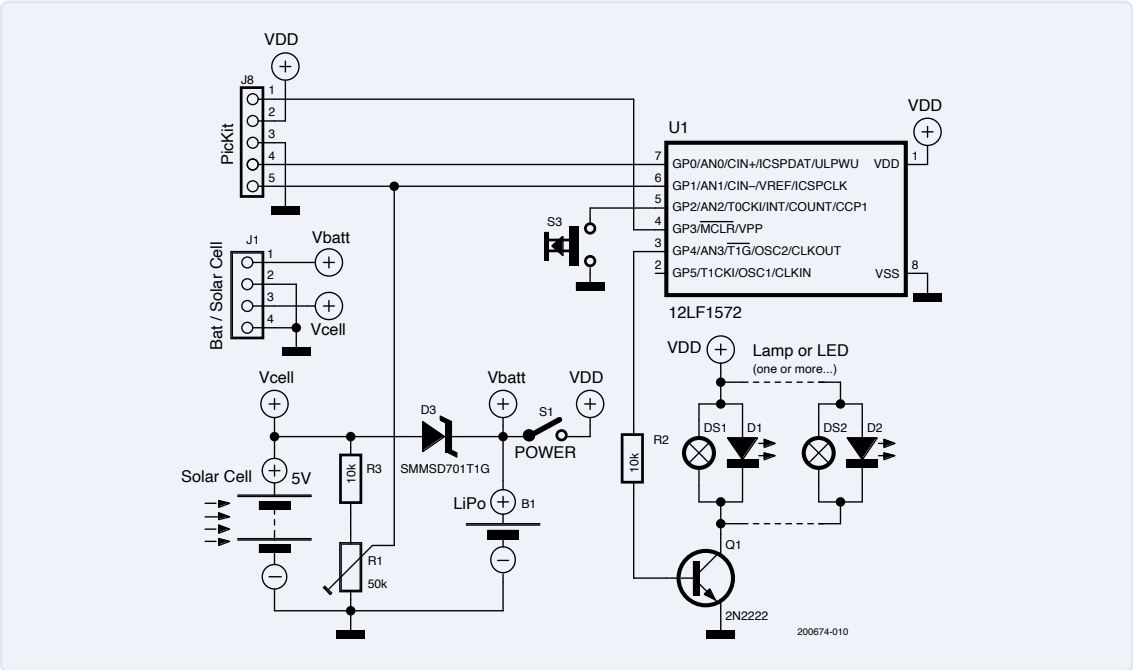


Figuur1. De 3D-geprinte behuizing voor zowel de elektronica als de LiPo-cel.

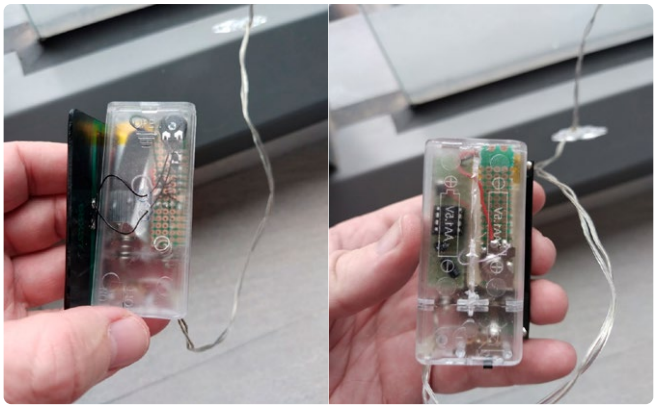


Figuur 2. Het kleine zonnepaneel om de LiPo-cel overdag op te laden.

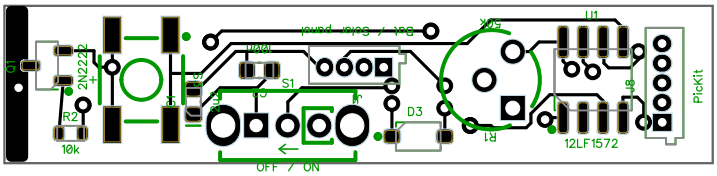
Aan het einde van elke cyclus is er een wachttijd van 2000 ms.
De lus zal elk patroon alleen activeren als het zonnepaneel geen spanning (0 V) levert. Als er daglicht is, zal er geen patroon worden geactiveerd en zal de lus dus voortdurend 2 s wachten.
Alle lange vertragingen maken gebruik van de `tempo()`-functie. Deze functie maakt op zijn beurt gebruik van de `sleep()`-functie en de watchdog-functie, die is ingesteld op 2000 ms. Dit is de beste oplossing om energie te sparen.



Figuur 3. Het eenvoudige schema voor dit project.



Figuur 4. Het eerste functionele prototype van voren (links) en van achteren (rechts).

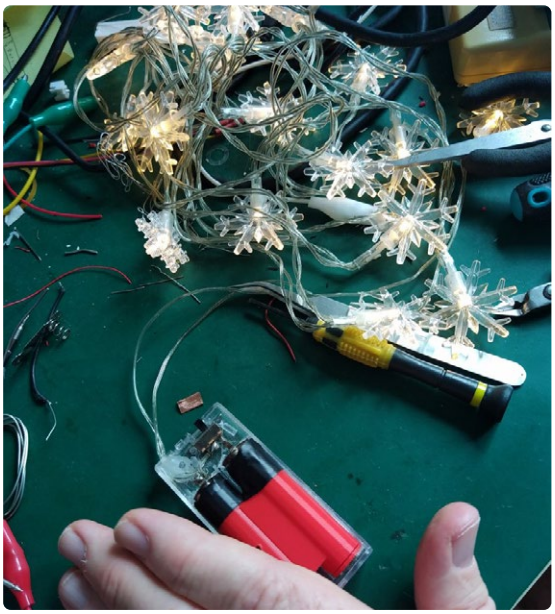


Figuur 5. De enkelzijdige print-layout ter grootte van een AA-batterij.

Implementatie

Na de realisatie van het eerste werkende prototype (**figuren 4a en 4b** tonen voor- en achterzijde), maakte mijn zoon de dummybehuizing voor twee AA-batterijen met behulp van Tinkercad [2] (figuur 1). Aan de kant van de plus-aansluiting plaatsen we de lithium-polymeeraccu – elke grootte en capaciteit die erin past. De positieve aansluiting van de accu gaat naar de oorspronkelijke positieve aansluiting van de slinger en met een andere draad naar de print, waarvan de layout te zien is in **figuur 5**.

De minpool van de accu is rechtstreeks verbonden met de print. De collector van de 2N2222 (je kunt elke andere NPN-schakeltransistor gebruiken) wordt aangesloten op de oorspronkelijke min-aansluiting van de slinger.



Figuur 6. De voltooide schakeling plus oplichtende slinger.

De print kan worden gemonteerd in de tweede ruimte van de dummybehuizing, met draden naar de accu en het zonnepaneel (tweede connector).

Voor de verbinding met de originele slinger-aansluiting gebruikte ik een stuk koperfolie dat op de dummy-accu was gelijmd. Het eindresultaat van mijn inspanningen is te zien in figuur 6, compleet met fraai oplichtende LED-slinger.

200674-03

Over de auteur

Laurent is 60 jaar, woont al meer dan 20 jaar in Azië en is sinds zijn tiende levensjaar gepassioneerd door elektronica. Hij heeft veel tijdschriften gelezen, waaronder Elektor sinds 1978. Laurent begon met microcontrollers te stoeien in de jaren '80 (de 8051-familie) en meer recent met de PIC-familie en de ESP32 wanneer een netwerkverbinding nodig is. Hij heeft veel versterkers gebouwd, zowel met halfgeleiders (Elektor) als met buizen (300B SE), evenals luidsprekersystemen en DAC's. Hij werkt al meer dan 30 jaar in de mobiele telefonie (hardware, software, bediening, kwaliteit) voor een Frans bedrijf.

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.

Gerelateerde producten

- **Bert van Dam, PIC Microcontrollers (Elektor E-book)**
  www.elektor.nl/18093
- **Seeed Studio Solar Panel for Outdoor Environments**
  www.elektor.nl/19131
- **Diamex LED Player M**
  www.elektor.nl/19911

WEBLINKS

[1] PCB-layout en softwarepakket voor dit project: https://elektormagazine.com/labs/solar-power-christmas-garland
[2] Autodesk Tinkercad-website: https://tinkercad.com

Elke week dat u zich niet inschrijft voor ons Elektor E-zine mist u leuke elektronica-gerelateerde artikelen en projecten!

Blijf op de hoogte, word creatief en win prijzen - Schrijf je nu in om mee te doen!

www.elektor.nl/ezine

Wat kunt u verwachten?

Redactioneel
Elke vrijdag ontvangt u de beste artikelen en projecten van de week. We behandelen MCU-gebaseerde projecten, IoT, programmeren, AI, en meer!

Deals
Ontvang wekelijks geweldige deals en hoge kortingen op elektronica kits, modules, componenten, technische boeken en labapparatuur.

Partner mailing
Wil u op de hoogte blijven van de lopende activiteiten binnen de branche? Dan geeft deze e-mail u de beste inzichten. Niet regelmatig maar altijd op woensdag

elektor
design > share > earn

USB-Killer-**detector**

voorkomen is beter

Carlos Guzman (Verenigde Staten)

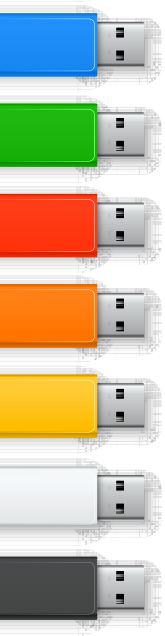
USB-killers zijn kwaadaardige apparaten die vermomd zijn als USB-sticks. Wanneer zo'n ding wordt aangesloten op de USB-poort van een computer, tablet of telefoon, zal het proberen de USB-poort te vernietigen – en daar blijft het niet bij. Met de hier beschreven schakeling kun je dergelijke pen drives identificeren voordat ze schade kunnen aanrichten.

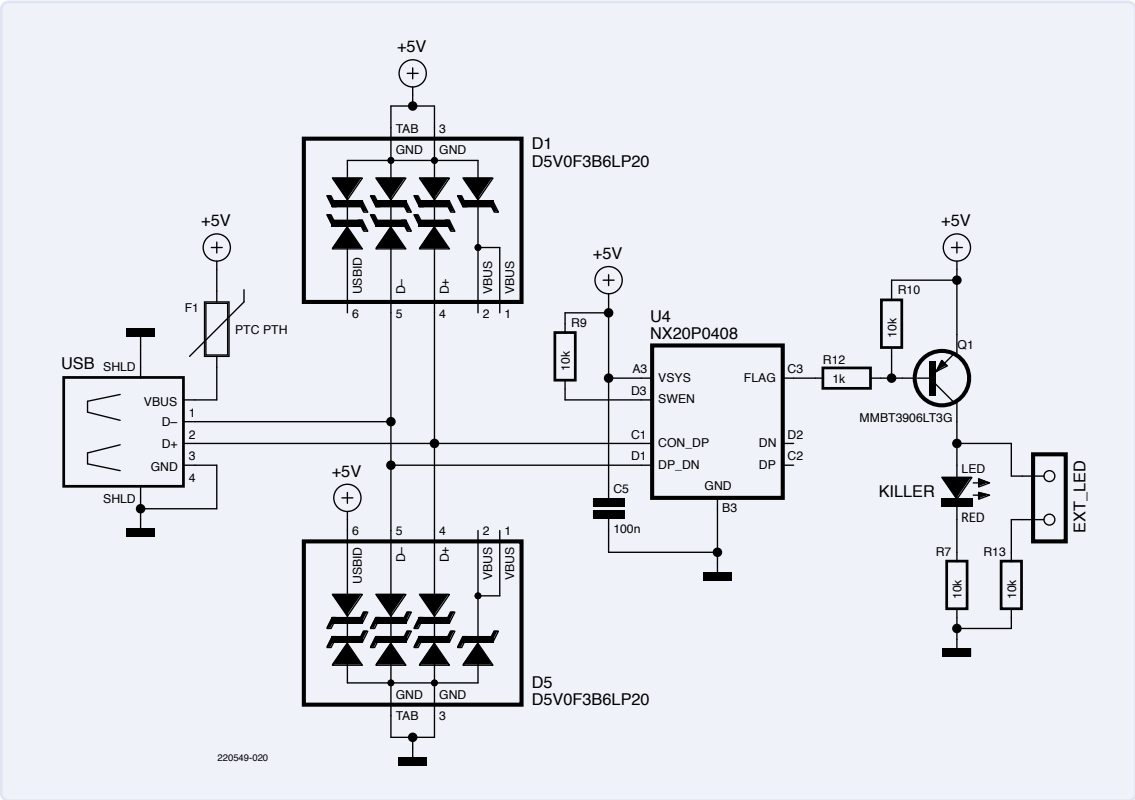
USBKill [1] is een USB-stick voor *penetration tests* die de 5 V van een USB-poort transformeert tot ongeveer –200 V, wat leidt tot de vernietiging van bijvoorbeeld een PC, laptop of zelfs een telefoon. Omdat ze een logo aan de buitenkant hebben dat duidelijk aangeeft dat ze voor zogenaamde pen tests bedoeld zijn en navenant voorzichtig behandeld moeten worden, vormen deze geen echt gevaar.

Gevaarlijker zijn echter de zogenaamde 'USB-killer' sticks die niet te onderscheiden zijn van normale flashdrives. Ze zien eruit als gewone flashdrives, maar kunnen ernstige schade toebrengen aan apparaten waarop ze worden aangesloten.

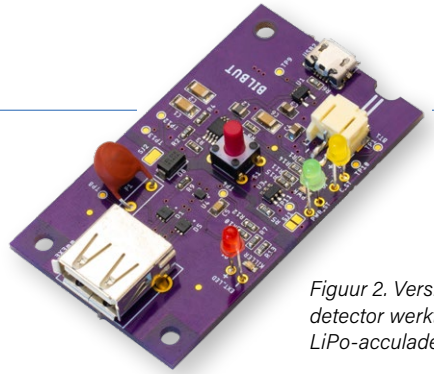
Mijn persoonlijke ervaring

Mijn vader koopt veel spullen online – ook elektronicacomponenten, want hij is elektrotechnicus, maar hij neemt ook onnodige producten mee naar huis, zoals een overdaad aan schroeven, moeren en gereedschap. Hij heeft thuis een werkkamer die nauwelijks nog begaanbaar is. Een tijdje geleden had ik een oude film op mijn computer staan die ik op TV wilde bekijken, dus zocht ik een USB-stick. Omdat ik er geen bij de hand had, ging ik naar de elektronicakamer van mijn vader en vond er een. Ik sloot hem aan op mijn computer maar er gebeurde niets; het bleek dat de computer was uitgeschakeld. Alleen het zwakke geluid dat net na het insteken van de USB-stick was begonnen, was nog hoorbaar.

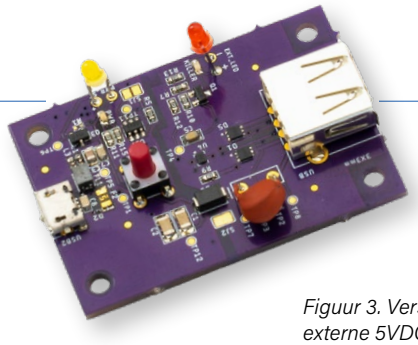




Figuur 1. Het schema van de USB-killer-detector zonder voeding. De rode LED geeft gevaar aan.



Figuur 2. Versie 1 van de USB-killer-detector werkt op batterijen en bevat een LiPo-acculader plus boost-converter.



Figuur 3. Versie 2 heeft een externe 5VDC-voeding nodig.

Nadat ik me realiseerde dat mijn computer niet meer wilde opstarten, controleerde ik alle kabels en de netvoeding. Alles werkte zoals gewoonlijk, behalve mijn computer die elke dienst weigerde. Na een paar dagen onderzoek bleek de oorzaak de USB-stick uit mijn vaders werkkamer te zijn. Aan de buitenkant was niet te zien wat het was. Het zag eruit als een doodnormale USB-stick, maar het was in feite een USB-killer.

Waarom?

Net als ik vraag je je misschien af waarom USB-killers bestaan. Het antwoord lijkt vooral zoiets te zijn als 'nou gewoon'. Daarom besloten mijn vader en ik een schakeling te ontwikkelen die USB-killers kan detecteren voordat ze schade aanrichten aan een computer.

Onze oplossing

Een USB-killer gebruikt de 5 V van de USB-poort om pulsen van ongeveer –200 V op de USB-datalijnen te zetten. Dit is een uiterst effectieve manier om USB-poorten en meer om zeep te helpen. De USB-killer-detector maakt gebruik van een speciaal IC dat de USB-datalijnen beveiligt: de NX20P0408 van NXP [2] dat signaleert als er iets niet in orde is op deze pinnen. Het waarschuwingssignaal stuurt een rode LED aan. Als die LED oplicht, moet je de USB-stick vernietigen die je zojuist hebt aangesloten.
Extra TVS-diodes zorgen ervoor dat de detector zelf niet het loodje legt. Een PTC biedt nog meer bescherming door de killer-stick uit te schakelen als die domweg te gevaarlijk is om te hanteren.

Twee versies

We hebben twee versies van de USB-killer-detector ontwikkeld:

1. Een draagbare accugevoede versie die je overal mee naartoe kunt nemen (**figuur 2**). De schakeling bezit een LiPo-acculader en een boost-converter om de accuspanning om te zetten in 5 V voor de USB-stick.
2. Een extern gevoede versie omdat het moeilijk is om (apparaten met) LiPo-accu's te verzenden, en we wilden de USB-killer-detector online verkopen. Deze heeft een microUSB-kabel nodig die 5 V levert (**figuur 3**). Gebruik een telefoonlader voor de voeding, niet je computer.

De ontwerpbestanden voor beide versies van de schakeling zijn te vinden op GitHub [3].

Een woord tot slot

Denk je dat de USB-killer-stick een broodje-aap-verhaal is? Nou, denk dan nog maar eens na. In 2019 werd in de VS een man veroordeeld tot 12 maanden gevangenisstraf en een boete van 58.471 dollar nadat hij opzettelijk 66 computers had vernietigd met een USB-killer op een school in Albany [4].
De video van link [5] is in totaal meer dan 20 miljoen keer bekeken gedurende de afgelopen vijf jaar, wat neerkomt op tienduizend maal per dag, elke dag. Een soortgelijke video [6] is de afgelopen twee jaar bijna twee miljoen keer bekeken. En heb je ooit gezocht naar USB-killer-sticks bij online-handelaren? Je zult zien dat ze gemakkelijk verkrijgbaar zijn.
USB-killer-sticks bestaan echt – je bent gewaarschuwd!
Als je me wilt helpen in de strijd tegen USB-killers, doe dan mee op [7].

220549-03

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via instant.devices@yahoo.com of naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.

Gerelateerde producten

- **Elektor Archive 1974-2022 (USB Stick)**
  www.elektor.nl/20372
- **The Elektor Power Supply Collection (USB Stick)**
  www.elektor.nl/20451

WEBLINKS

[1] USBKill: https://usbkill.com
[2] Datasheet NX20P0408:
https://nxp.com/products/power-management/load-switches/single-chip-usb-data-lines-protection-solution:NX20P0408
[3] Het volledige project op GitHub: https://github.com/instantdevices/USB-Killer-Detector
[4] Rechtszaak VS: https://justice.gov/usao-ndny/pr/former-student-sentenced-destroying-computers-college-st-rose
[5] Demovideo 1: https://youtu.be/Y1o1nwlpY4I
[6] Demovideo 2: https://youtu.be/FLkXiP1fC2A
[7] Help me in de strijd tegen USB-killers: https://opencollective.com/usb-killer-detector
[8] Dit project op Elektor Labs: https://elektormagazine.com/labs/usb-killer-detector-v1

Een eenvoudige behuizing **CNC**'en

met Autodesk Fusion 360 voor persoonlijk gebruik

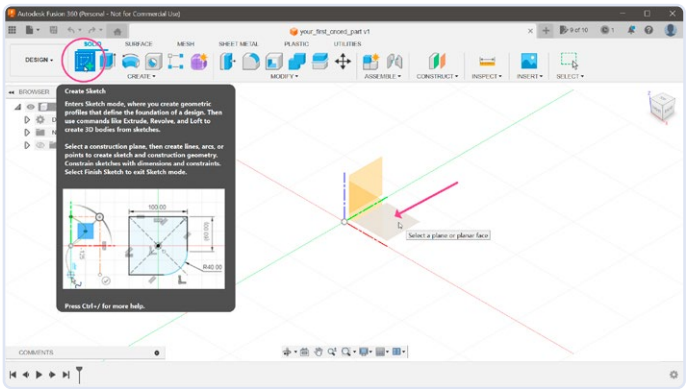
Vaclav Krejci (Tsjechië)

Op maat gemaakte behuizingen voor je DHZ-projecten hoeven niet per se 3D-geprint te worden – ze kunnen ook machinaal gemaakt worden uit metaal zoals aluminium, met een zeer professioneel resultaat. Zelfs als je geen eigen CNC-machine hebt blijft het betaalbaar, de softwaretools zijn gratis en de diverse stappen zijn niet moeilijk.

In deze tutorial leer je hoe je een behuizing op maat kunt maken voor de draai-encodermodule van DFRobot. Omdat veel behuizingen dezelfde onderdelen hebben, is dit een goed uitgangspunt om een eigen behuizing voor je eigen project te maken.
Voor het modelleren gebruiken we Autodesk Fusion 360 voor persoonlijk gebruik. Deze software is gratis en bedoeld voor hobbyisten en niet-commercieel gebruik. Er zijn enkele beperkingen in vergelijking met de volledige (betaalde) versie, maar geen daarvan zijn van invloed op ons project.

Gebruikte tools:
- Autodesk Fusion 360 (persoonlijke editie) [1]

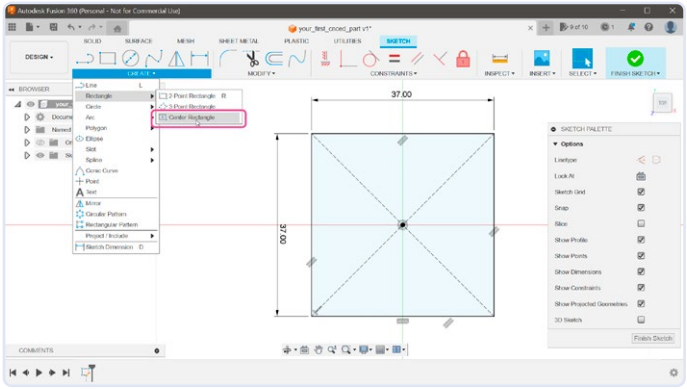
Gebruikte onderdelen:
- draai-encodermodule van DF Robot [2]
- Arduino UNO (maar elk Arduino-board werkt met de module)



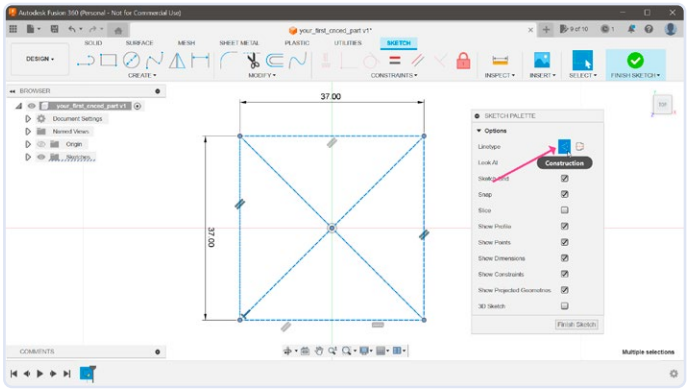
Figuur 1. Eerste stappen voor het plaatsen van je sketch (alle screenshots: Autodesk).

Stappen

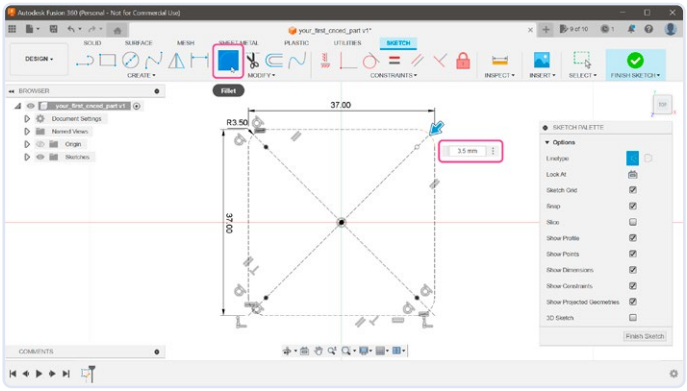
1. De eerste stap bij het maken van een 3D-model is beginnen met een 2D-tekening, een zogenaamde Sketch (**figuur 1**). Klik in Fusion 360 op de knop *Create Sketch* op de werkbalk en selecteer een vlak waarop de schets geplaatst moet worden. Aangezien onze behuizing naar boven wordt geëxtrudeerd, is het logisch om de schets op het onderste vlak in de 3D-ruimte te plaatsen.
2. Met behulp van een schuifmaat heb ik gemeten dat de draai-encodermodule 37×37 mm groot is. We tekenen een rechthoek om de grootte van de print te visualiseren (**figuur 2**). Ga naar *Create → Rectangle → Center Rectangle*. Zodra het gereedschap actief is, plaats je het eerste punt in de oorsprong. Gebruik het toetsenbord om de maat (37) in te voeren, spring naar het volgende veld met de Tab-toets en voer de tweede waarde (ook 37) in. Druk op *Enter* om het proces te voltooien.



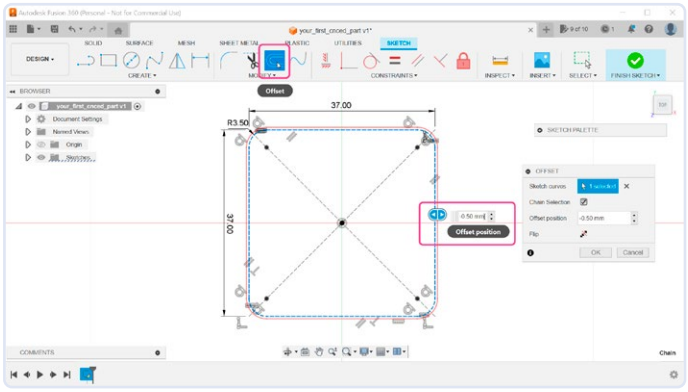
Figuur 2. De afmetingen van de rechthoek opgeven.



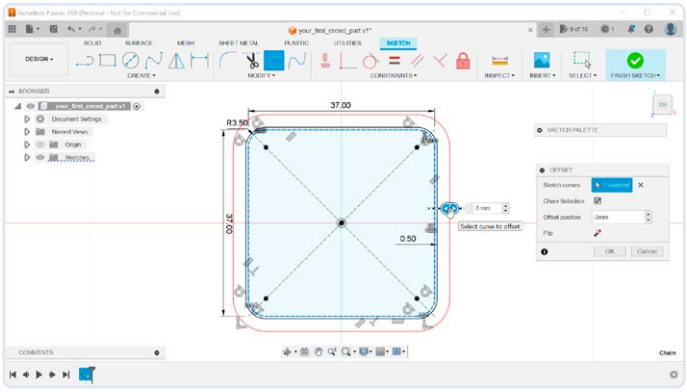
Figuur 3. Lijndefinitie wijzigen in Construction-modus.



Figuur 4. De hoeken van de behuizing afronden.

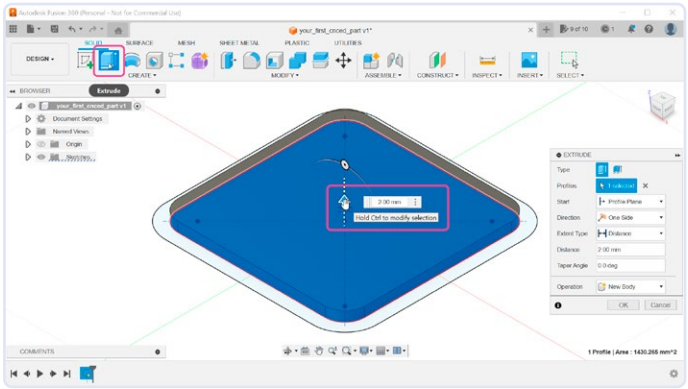


Figuur 5. De behuizing een tikje groter maken zodat de print beter past.

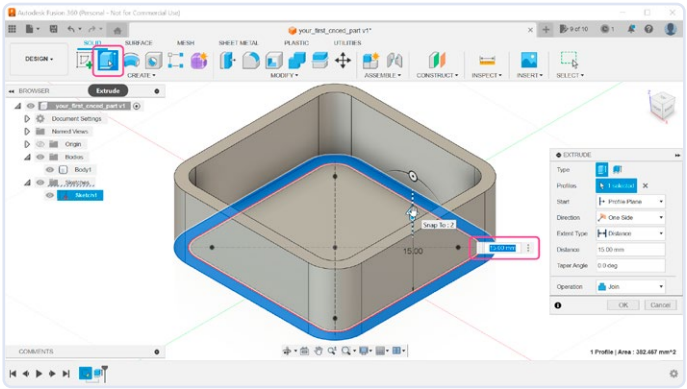


Figuur 6. De dikte van de wanden instellen.

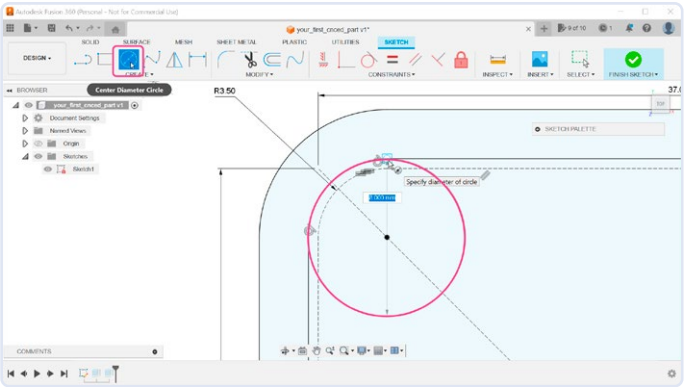
3. We gebruiken deze vorm niet om de behuizing te extruderen omdat we ruimte nodig hebben rond de print. Daarom selecteren we alle lijnen en veranderen deze in constructielijnen door op de knop *Construction* te klikken in het dialoogvenster *Sketch Palette*. Zo weet Fusion 360 dat dit slechts hulplijnen zijn (**figuur 3**).
4. De print heeft afgeronde hoeken en het zou mooi zijn als onze behuizing die ook heeft (**figuur 4**). Een ruwe meting laat zien dat de hoekstraal ongeveer 3,5 mm is. Selecteer in de werkbalk het *Fillet*-gereedschap en klik afzonderlijk op alle buitenste lijnen. Voer 3,5 mm in als *Fillet Radius*.
5. De behuizing moet een tikje groter zijn dan deze rechthoek met afgeronde hoeken zodat de print er probleemloos in past (**figuur 5**). Selecteer in de werkbalk het gereedschap *Offset* en voer een waarde van –0,5 mm in.
6. Er is nog een offset omdat de wanden van onze behuizing een zekere dikte moeten hebben (**figuur 6**). Herhaal de voorgaande stap, geef nu een offset van –3 mm in. Zo krijgen we later 2,5 mm dikke wanden.
7. We hebben voldoende vormen om te beginnen met extruderen. Sluit de bewerking van de sketch af door op de knop *Finish Sketch* te klikken; selecteer vervolgens het *Extrude*-gereedschap in de werkbalk (**figuur 7**). Klik op de binnenste afgeronde rechthoek van de sketch en voer een afstand van 2 mm in.
8. We wilden de wanden van de behuizing extruderen, maar die lijken plotseling verdwenen te zijn. Maak je echter geen zorgen: het is gewoon de sketch die onzichtbaar is. Open in de browser in de linkerbovenhoek (**figuur 8**) de groep *Sketches* en maak *Sketch1* zichtbaar. Nu kun je in de werkbalk het gereedschap *Extrude* selecteren en op de buitenste afgeronde rechthoek klikken. Voer een afstand van 15 mm in, de hoogte van onze behuizing.



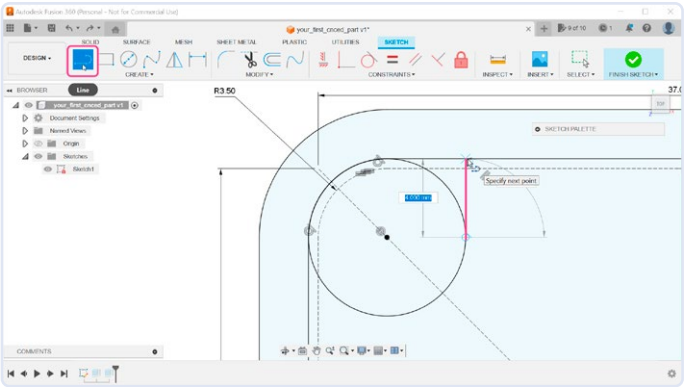
Figuur 7. Start van het extruderen!



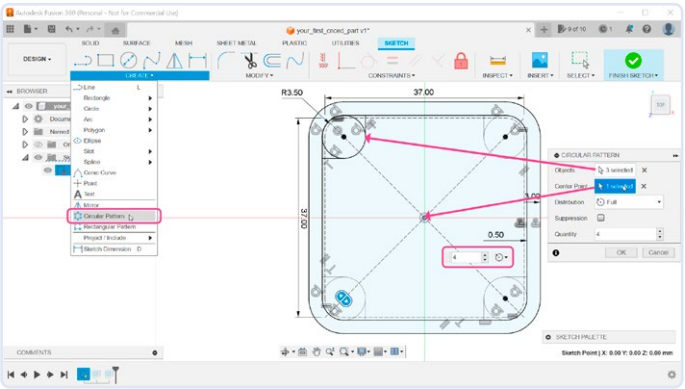
Figuur 8. Geef de hoogte van de behuizing op.



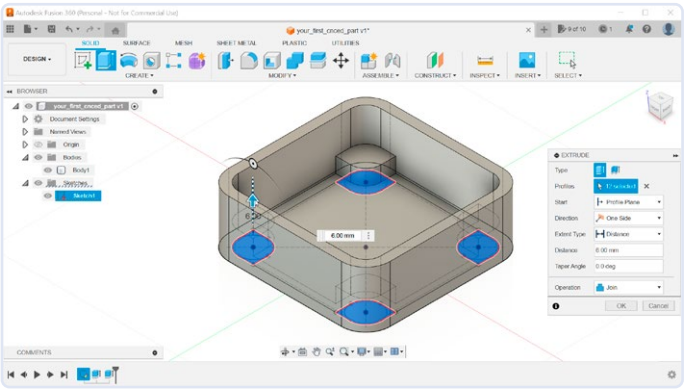
Figuur 9. Positionering van het middelpunt voor een van de steunen.



Figuur 10. De steun vormgeven met het Line-gereedschap.

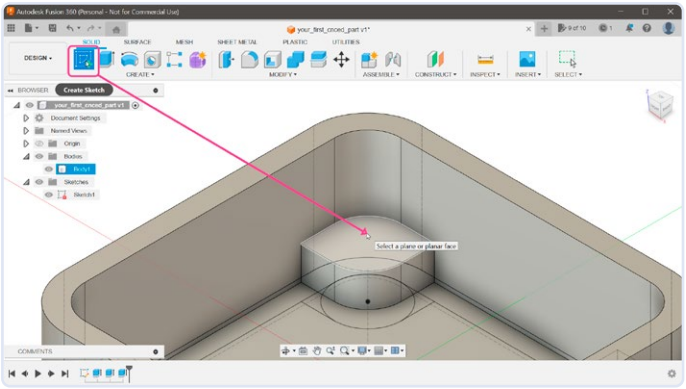


Figuur 11. De steun voor de andere drie hoeken dupliceren.

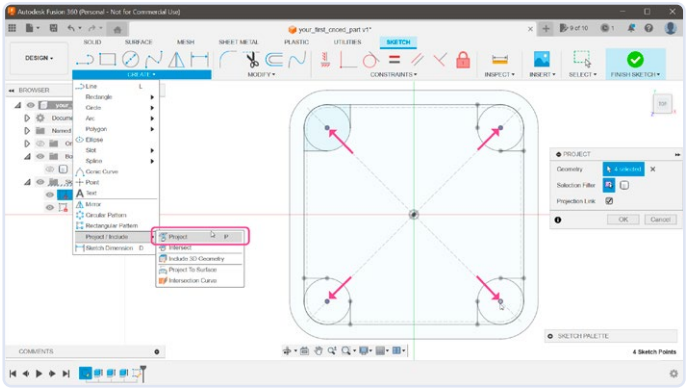


Figuur 12. De vier steunen extruderen.

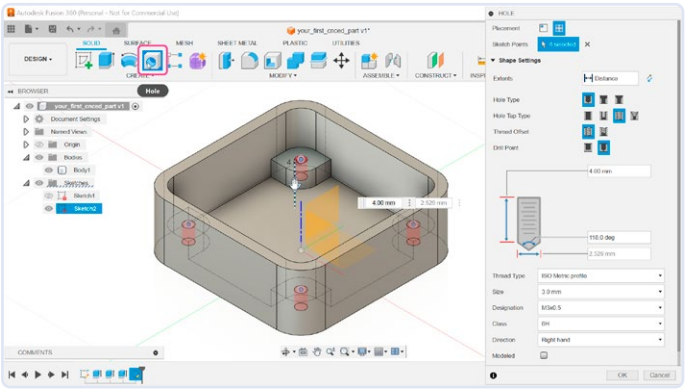
9. De module moet op vier steuntjes rusten, en het zou mooi zijn als we de module ook konden vastschroeven. Voor deze steunen hebben we nog een sketch nodig, maar in plaats van een nieuwe te maken, kunnen we de huidige sketch ook hergebruiken. Om terug te keren naar de bewerkingsmodus dubbelklik je op het item *Sketch* in het browservenster. De gaten in de print hebben een diameter van 3 mm; we moeten de steunen dus groter maken. Voor een eenvoudiger fabricage kunnen we ze zelfs zo groot maken dat ze de wanden van de behuizing raken. Selecteer het *Center Diameter Circle*-gereedschap in de werkbalk en teken een cirkel in de linkerbovenhoek – groot genoeg om de binnenwand van de behuizing te raken (8 mm diameter, **figuur 9**).
10. Het min of meer wigvormige gebied tussen de cirkel en de wand is wel erg smal (**figuur 10**) en is zo moeilijk te fabriceren. We kunnen het sluiten door meer vormen te tekenen met een lijngereedschap. Selecteer in de werkbalk het *Line*-gereedschap en beweeg de cursor naar het middelpunt van de cirkel. Blijf daarna de muiscursor naar rechts bewegen tot je bij de cirkel zelf komt. Teken daar het eerste punt van de lijn. Verplaats de muiswijzer naar boven tot je bij de wand bent. Teken daar een tweede punt van de lijn. Zorg ervoor dat de beweging min of meer een rechte lijn volgt – Fusion 360 zal dan automatisch de nodige constraints toevoegen.
11. Er zijn nog drie steunen nodig, maar in plaats van deze met de hand te tekenen, kunnen we enkele tools gebruiken om de huidige steun te dupliceren. Een voor de hand liggende keuze is het *Mirror*-gereedschap (*Create* → *Mirror*). Een oplossing met één klik is in dit geval echter het gereedschap *Circular Pattern*, ook te vinden in het *Create*-menu. Met het gereedschap actief moeten we de cirkel en de twee lijnen selecteren (**figuur 11**). Klik op de knop *Select* naast het middelpunt en selecteer daarna de oorsprong. Voer voor *Quantity* een waarde van 4 in.
12. Op dit punt kunnen we het bewerken van de sketch afronden door op de knop *Finish Sketch* te klikken en kunnen we de steunen extruderen. Als de body zichtbaar is, kan het lastig zijn om de gewenste vlakken van de sketch te selecteren. Een eenvoudigere oplossing is om *Body1* tijdelijk te verbergen in de browser, het *Extrude*-gereedschap te selecteren (**figuur 12**) en de vormen uit de schets te selecteren. Voordat je echter gaat extruderen, moet je *Body1* weer zichtbaar maken, omdat de steunen met deze body moeten worden verbonden. De afstand moet 6 mm zijn en zorg er in het dialoogvenster *Extrude* voor dat de *Operation* is ingesteld op *Join*.
13. Het zou mooi zijn als er schroefgaten in die steunen zaten. We hebben de positie van deze gaten al (de middelpunten van de cirkels), maar die hebben de verkeerde Z-positie. De punten bevinden zich aan de onderkant van de behuizing, maar we moeten ze aan de bovenkant van de steunen hebben. Om die punten te verplaatsen, maken we een nieuwe sketch; we selecteren daarom de knop *Create Sketch*; voor de positie van deze sketch klikken we op het bovenste vlak van een van de steunen (**figuur 13**).
14. Om die punten naar de nieuwe sketch te kopiëren, selecteer je *Create Project/Include Project* (**figuur 14**). Klik op alle vier de punten en bevestig met de knop *OK*. Als je het 3D-aanzicht draait, zweven die nieuwe punten nu boven de originele sketch.
15. Sluit de sketch, maak *Body1* zichtbaar en selecteer het gereedschap *Hole* op de werkbalk. Klik op alle vier de punten en configureer het gat (**figuur 15**). Stel *Hole Type* in op *Tapped*. De schroefdraad moet *ISO Metric profile* zijn en de grootte moet 3,0 mm zijn. Wat betreft de diepte, willen we niet dat de gaten helemaal doorlopen en aangezien de steunen 6 mm boven het grondvlak zijn geëxtrudeerd, zou een diepte van 4 mm goed moeten zijn.



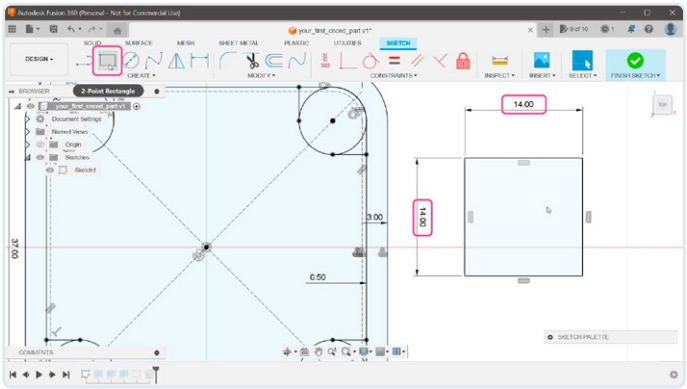
Figuur 13. Het gat in de steun.



Figuur 14. Herhalen voor de drie andere hoeken.

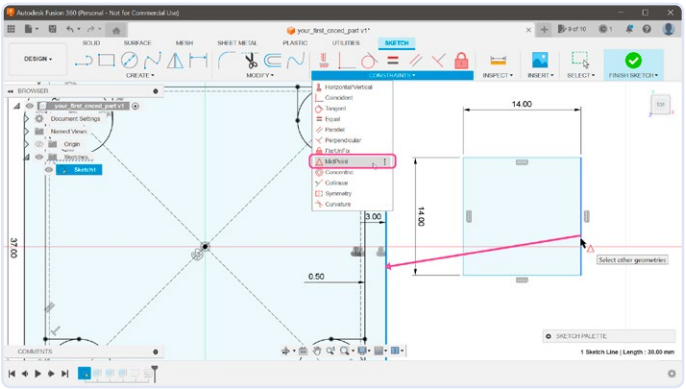


Figuur 15. Diepte en schroefdraad voor de gaten instellen.

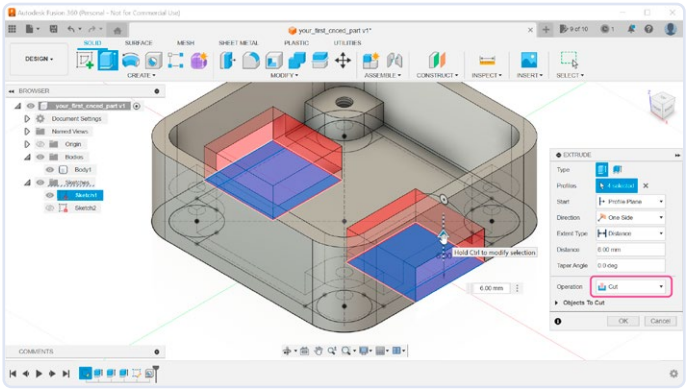


Figuur 16. Voorbereiding van de twee rechthoekige openingen aan de onderkant van de behuizing.

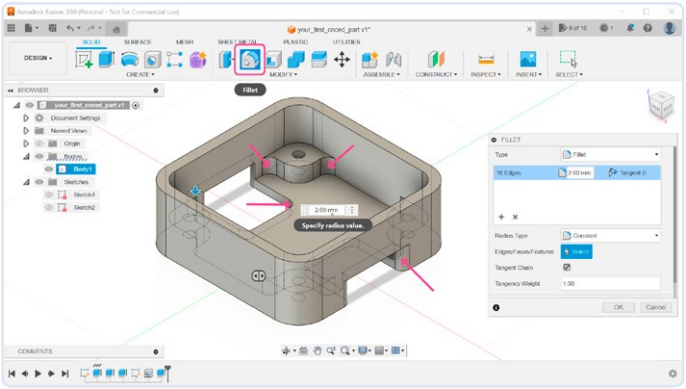
16. We hebben twee rechthoekige openingen nodig aan de onderkant van de behuizing om de connectoren aan de onderzijde van de print toegankelijk te maken. De connectoren hebben ietwat verschillende afmetingen, maar een openinge van 11×14 mm is voor beide in orde. We moeten rekening houden met de wanddikte (3 mm), waardoor de opening 14×14 mm groot wordt. Voor het tekenen hiervan kunnen we onze oorspronkelijke sketch hergebruiken. Open deze voor bewerking en selecteer het *2-Point Rectangle*-gereedschap (**figuur 16**) in de werkbalk. Teken ergens op het werkblad een rechthoek van 14×14 mm.
17. Selecteer om de rechthoek naar de juiste positie te verplaatsen de constraint *MidPoint* (**figuur 17**) uit de *Constraint*-groep in de werkbalk. Klik eerst op de rechterlijn van de zojuist aangemaakte rechthoek. Klik vervolgens op de rechterlijn van de wand van de behuizing. Nu zijn beide lijnen op het middel uitgelijnd en wordt de rechthoek verplaatst naar de juiste positie. Herhaal de stappen voor de opening aan de linkerkant en sluit de sketch.
18. Draai de 3D-weergave om de onderzijde van onze behuizing te zien. Kies het *Extrude*-gereedschap (**figuur 18**) en selecteer vervolgens de nieuwe rechthoeken. Voer een afstand van 6 mm – dat is de hoogte van de steunen. De bewerking wordt automatisch gewijzigd in *Cut*.
19. De behuizing is bijna klaar. We hebben een basisvorm, steunen met schroefgaten en gaten aan de onderkant van de behuizing om de connectoren toegankelijk te maken. Hier aangekomen is het waarschijnlijk een goed idee om de vorm een beetje aan te passen, zodat de fabricage wat eenvoudiger wordt. Omdat het freesgereedschap een bepaalde diameter heeft, is het onmogelijk om scherpe hoeken aan de binnenzijde te maken. We kunnen dit eenvoudig oplossen door de haakse verbindingen ietwat af te ronden met het gereedschap *Fillet* (**figuur 19**) uit de groep *Modify*. Zodra het gereedschap actief is, selecteer je alle haakse binnenhoeken en voer je een kleine afrondingsstraal in – bijvoorbeeld 2 mm.



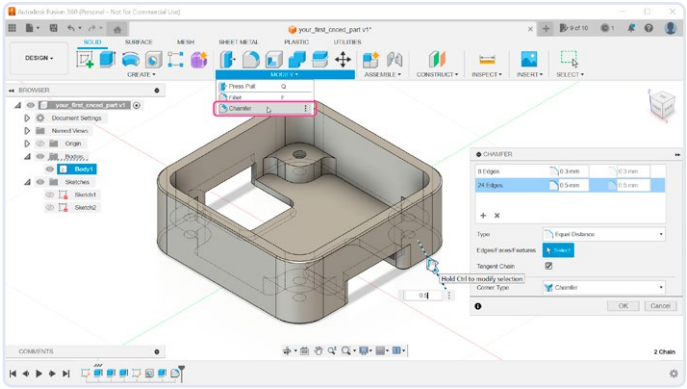
Figuur 17. De rechthoek centreren met de functie MidPoint.



Figuur 18. De twee openingen extruderen.



Figuut 19. De scherpe hoeken afronden.

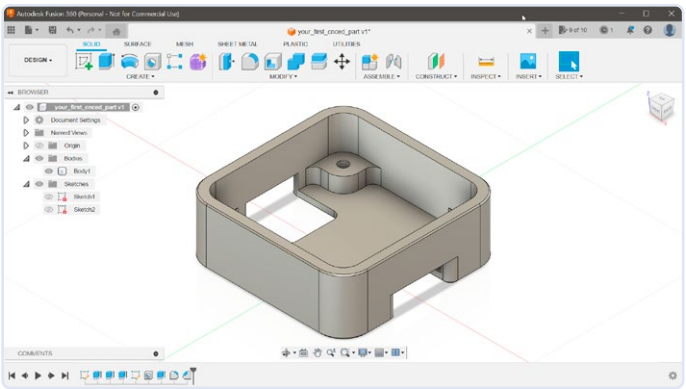


Figuur 20. Afschuinen van de buitenranden.

20. De scherpe randen aan de buitenkant kunnen worden een beetje afgeschuind met het gereedschap *Chamfer*. Selecteer het (**figuur 20**) in het submenu *Modify* en selecteer de buitenranden van de behuizing. Voor de bovenste rand heb ik een minimale waarde van slechts 0,3 mm gebruikt. Voor de onderrand is een grotere waarde van 0,5 mm ingesteld. Je kunt meerdere randen met verschillende waarden tegelijk afschuinen met behulp van de knop *Add Selection Set* in het dialoogvenster *Chamfer*.
21. Hiermee (**figuur 21**) is de behuizing klaar voor fabricage. Een veelgebruikt bestandsformaat voor 3D-tekeningen is een STEP-bestand (.step), dat kan worden geëxporteerd met de menu-optie *File Export*. Met dit bestand freest de gekozen dienstverlener [3] het echte, massief metalen prototype voor je uit. **Figuur 22** toont twee exemplaren (met verschillende afwerking) plus andere componenten; in **figuur 23** is de encoder gemonteerd, en in **figuur 24** is de compleet afgewerkte unit te bewonderen. Een uitgebreide video over de diverse stappen van dit project is te vinden op [4].

Het is echt zo eenvoudig

Autodesk Fusion 360 [1] is een complexe applicatie met tientallen tools, maar hopelijk heeft deze tutorial je laten zien dat je voor het maken van een eenvoudige behuizing maar een paar daarvan nodig hebt. Hetzelfde resultaat kan meestal op meerdere manieren worden bereikt, dus als het voor jou werkt, hoef je je niet veel zorgen te maken of het wel de juiste aanpak is. Elke fabrikant zal bereid zijn om kleine problemen aan te pakken, en als je ergens niet zeker van bent, vraag het dan. De behuizing uit deze tutorial is gemaakt door PCBway [3]



Figuur 21. De behuizing is klaar voor productie.

Figuur 22. Twee behuizingen met de andere benodigde onderdelen, net voor de eindassemblage.

Figuur 23. De encoder is geïnstalleerd.

Figuur 24. Het volledig gemonteerde prototype.

en kost $ 37 plus verzendkosten. Dit is inclusief keramisch parelstralen van het CNC-bewerkte deel (voor een glad oppervlak) en anodiseren (voor een betere oppervlaktekwaliteit en een fraai uiterlijk). Als je genoegen neemt met de aanblik van ruw metaal, kun je hier een paar dollar besparen. En als je een lokale fabrikant kunt vinden, kun je waarschijnlijk ook besparen op de verzendkosten. Veel succes met het maken van je eigen behuizingen voor je grandioze projecten!

230361-03

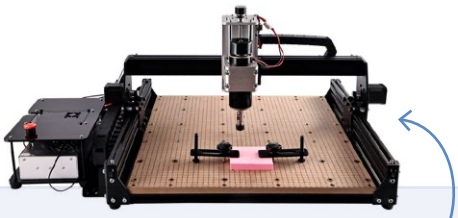
Over de auteur

Vaclav Krejci publiceerde zijn eerste (online) tutorial in 1998 en bleef dat in de jaren daarna doen. Na honderden tutorials over graphics besloot hij een boek te schrijven: GUI Design in Adobe Photoshop (gepubliceer in 2007). Dat was goed voor zijn carrière, maar zette .zijn publicatie-activiteiten helaas op een laag pitje.

Tijdens Covid (in 2020) ontdekte Vaclav Arduino en zijn groeiende interesse in elektronica. Vaclav realiseerde zich ook dat het vastleggen van zijn kennis en het omzetten van zijn bevindingen in tutorials hem helpt om projecten af te maken die anders voor altijd onvoltooid zouden blijven. Dit keer is zijn belangrijkste platform YouTube, met video-tutorials. Hopelijk inspireren Vaclavs projecten anderen bij hun ontdekkingsreizen.

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via info@upir.org of naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.



Gerelateerde producten

- **Anet 4540 Desktop CNC Router Machine (SKU 20260)**
  www.elektor.nl/20260
- **Arduino Uno SMD Rev3 (SKU 19938)**
  www.elektor.nl/19938

WEBLINKS

[1] Downloaden van Autodesk Fusion 360 Personal: http://www.autodesk.nl/products/fusion-360/trial-intake
[2] Gravity 360 Encoder van DFRobot: https://dfrobot.com/product-2575.html
[3] PCBway voor CNC: https://pcbway.com
[4] Tutorial Video op YouTube: https://youtu.be/EB8PISr4m4g
[5] Plezier met Autodesk: https://youtu.be/vNKx29qEyJ4

ONS ASSORTIMENT
VAN TECHNICI VOOR TECHNICI

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

Voor u alleen het beste –
van meer dan 1.500 merkfabrikanten

Onze productmanagers zijn al vele jaren bij reichelt actief en kennen de eisen van onze klanten. Zij stellen een breed scala aan kwaliteitsproducten samen, optimaal afgestemd op de behoefte bij onderzoek en ontwikkeling, onderhoud, IT-infrastructuur, kleine serieproducties en makers.

Ontwikkelaarsboards – compacte specialisten voor elektronicaprojecten

Raspberry Pi APPROVED RESELLER
Raspberry Pi 5 B

ARDUINO OFFICIAL RESELLER 2021
Arduino UNO Rev4 WiFi

NVIDIA
NVIDIA Jetson Nano Bundle

Ontdek nu ▶ https://rch.lt/boards-nl

DAGPRIJZEN! Prijzenstand: 18. 10. 2023

- Geweldige prijs-kwaliteitverhouding
- Meer dan 130.000 geselecteerde producten
- Betrouwbare levering - vanuit Duitsland over de hele wereld

reichelt elektronik – The best part of your project

www.reichelt.com
Bestelservice: +31 85 208 62 94

De wettelijke herroepingsregelingen zijn van toepassing. Alle aangegeven prijzen in euro inclusief de wettelijke BTW, excl. verzendkosten voor de totale winkelwagen. Uitsluitend onze Algemene Voorwaarden (zie hiervoor https://rch.lt./AV-NL of op aanvraag) zijn van toepassing. Afbeeldingen kunnen afwijken. Drukfouten, vergissingen en prijswijzigingen voorbehouden.
reichelt elektronik GmbH, Elektronikring 1, D-26452 Sande, Tel.: +31 85 208 62 94

Printen in **geringe aantallen** produceren

met en zonder assemblage

Saad Imtiaz (Elektor)

Je hebt dus een print voor je schakeling ontworpen en getest, en nu wil je die in (kleine) hoeveelheden produceren. Maar als je niet de financiële reserves bezit om gewoon 10.000 geassembleerde printen te bestellen en ze ergens op te slaan om later op je gemak te verkopen, welke alternatieven heb je dan?

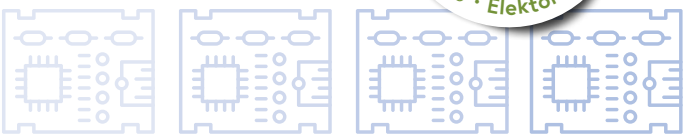
De eerste mogelijkheid die bij je opkomt is de printen zelf te assembleren. Dat is heel goed mogelijk als het om kleine aantallen gaat en de print niet te veel componenten heeft (**figuur 1**). Dat klinkt misschien eenvoudig, maar er zijn een paar dingen waar je aan moet denken voordat je begint.
Eerst moet je een bedrijf kiezen dat de printen fabriceert. Dat kan een pooling-service zijn (zie het kader **Pooling**) als je maar een paar printen nodig hebt. Maar als je er (enkele) honderden nodig hebt, dan is het voordeliger om de offertes te vergelijken van diverse fabrikanten die niet poolen.

Component sourcing

Als je het printontwerpproces in de juiste volgorde hebt uitgevoerd, heb je al een onderdelenlijst (bill of materials – BoM) met voor elk onderdeel alle gegevens van de fabrikant en een adres van een bedrijf waar je het onderdeel kunt kopen. Het zou ideaal zijn als je voor alle onderdelen één enkele leverancier had, maar in de meeste gevallen is dat niet het geval. Om alle onderdelen te kopen moet je verschillende leveranciers in de arm nemen, en elke leverancier brengt verzendkosten in rekening. Slim winkelen bespaart je dus geld. Tegelijkertijd kost het je tijd, dus het is belangrijk om die twee tegen elkaar af te wegen.

Het board assembleren

Zodra je de printen en de componenten hebt, is het tijd om de printen te assembleren. Heb je het gereedschap dat hiervoor nodig is? Een kleine soldeerbout (**figuur 2**) is wellicht prima om een prototype in elkaar te zetten, maar werkt hij comfortabel genoeg om twintig, vijftig of honderd printen te assembleren? En de onderdelen – zijn het alleen through-hole componenten, alleen SMT, of is het een mix? Meestal wil je montagetechnieken niet combineren omdat dit de assemblage van printen bemoeilijkt. Alleen SMT is mooi omdat de print in een oven gesoldeerd kan worden. Het plaatsen van dergelijke onderdelen op de print is echter een delicaat karwei. En hiervoor is soldeerpasta nodig – heb je een stencil besteld om die goed aan te brengen? Hoe ga je het stencil uitlijnen op tientallen printen? Dat is gemakkelijker als de printplaten in een houder zitten.



Testen

Nadat de printen zijn geassembleerd, moeten ze worden getest. Hiervoor heb je geschikte apparatuur nodig. Het bouwen van een testopstelling of een programmer (of eventueel beide) kan een goed idee zijn.

Verkopen en verzenden

Als je ooit iets hebt verkocht op een site zoals eBay, dan weet je dat iets verkopen lastiger is dan alleen maar een koper vinden voor het product. Verkopen omvat ook factureren, in- en verpakken en verzenden, en dat kost allemaal tijd en geld.

Wat zijn de opties?

In feite moeten de hierboven genoemde problemen worden opgelost voor elke productiemethode die je kiest, van één exemplaar tot massaproductie. En omdat de productie van printen een complex proces is, zijn er veel bedrijven die diensten aanbieden om het je gemakkelijker te maken. Natuurlijk heeft alles een prijs, dus het is aan jou om het juiste compromis te vinden tussen kosten, tijd en gemoedsrust.

PCBA-pooling

Sommige printfabrikanten bieden een assemblageservice aan. Dit zijn zogenaamde PCBA-leveranciers, waar de 'A' voor 'assemblage' staat. Dus in plaats van een kale print bij hen te bestellen, kun je een volledig geassembleerde print bestellen. Dat klinkt handig, toch? Dat is het ook, maar er hangt niet alleen een prijskaartje aan, het maakt het zoeken naar componenten ook ingewikkelder. Jij hebt jouw BoM en zij hebben hun inventaris, en die twee zullen niet voor elke component overeenkomen – en misschien zelfs

Figuur 1. Print met bijbehorende componenten.

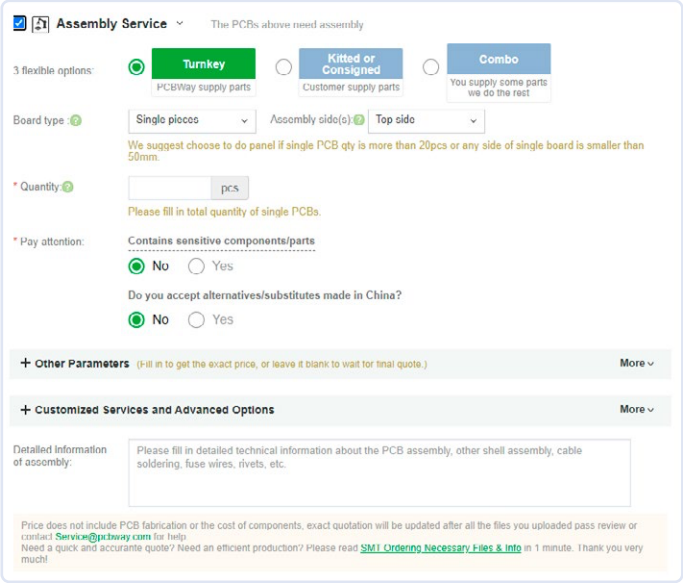
Figuur 2. Digitaal soldeerstation.

voor geen enkele component. Daarom moet je elk onderdeel op je componentenlijst zorgvuldig vergelijken met de onderdelen die het assemblagebedrijf voorstelt. Dat kost veel tijd. En natuurlijk is niet elk onderdeel op voorraad of zelfs maar leverbaar, waardoor kosten en tijdschema's twijfelachtig worden. Je kunt het ontwerp van je schakeling bij voorbaat aanpassen aan de voorraad van het assemblagebedrijf om deze stap te vereenvoudigen.

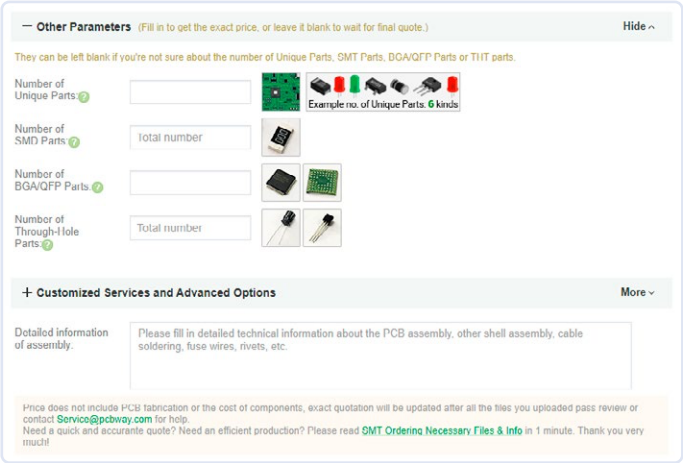
De meeste PCB pooling-services bieden ook assemblage aan (**figuur 3**) in combinatie met component sourcing, wat zeer nuttig kan zijn om je de hectische klus van het vinden en vervolgens solderen van de componenten uit handen te nemen; het solderen van een paar PCB's kan leuk zijn, maar meer dan een paar kan een kwelling worden.

Het bestellen van de assemblage van een print is bijna gelijk aan het bestellen van een kale print, maar de fabrikant vereist enkele extra gegevens, zoals het aantal componenten waarvan er maar één wordt gebruikt, het aantal SMD- en through-hole-onderdelen enzovoort (**figuur 4**). Het is een goede gewoonte om deze informatie toe te voegen aan de BoM en naast de naam van de componenten het type te vermelden. Dit voorkomt vergissingen door de fabrikant en bespaart tijd bij het afhandelen van de bestelling. De fabrikant zal je een offerte geven voor de assemblageservice nadat je informatie hebt gegeven over de componenttypes en -hoeveelheden enzovoort. In deze offerte zijn de kosten van de componenten niet inbegrepen. Nadat je je bestelling hebt ingediend, zal het ondersteuningsteam van de fabrikant zich ermee gaan bemoeien en je informeren of de componenten en hun referenties in de BoM overeenkomen met je print – of niet. Zij zullen je dan een offerte geven voor de componenten.

Om geld te besparen op componenten moet je de prijs van de componenten zorgvuldig bekijken en vergelijken met andere bronnen zoals Mouser, DigiKey en AliBaba (**figuur 5**). Het is redelijk om met hen in zee te gaan als de componenten een eerlijke prijs hebben en de juiste componenten worden aangeboden door de fabrikant. Meestal zijn sommige componenten niet beschikbaar en andere hebben een hogere dan de normale prijs. In dat geval is het beter om de componenten van AliBaba-resellers te betrekken, omdat zij meestal een veel lagere prijs bieden dan de PCB



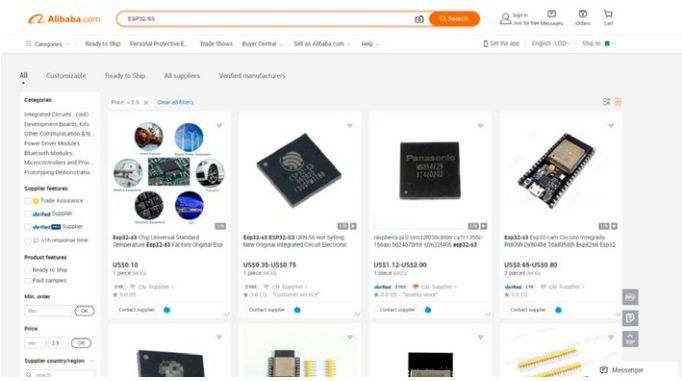
Figuur 3. Diverse assemblage-opties bij PCBWay.



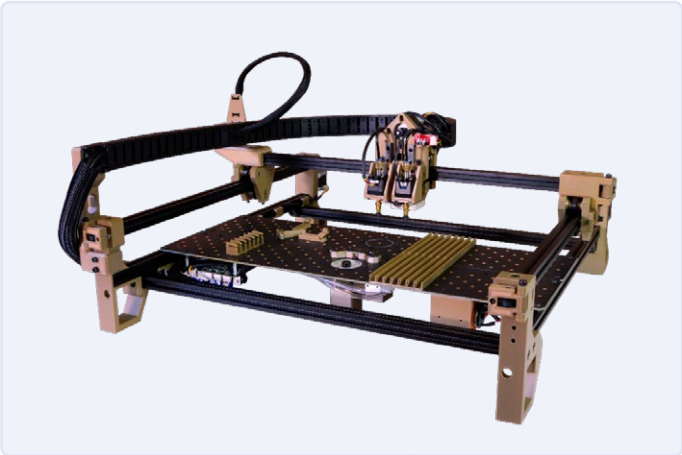
Figuur 4. Andere parameters voor assemblage-services bij PCBWay.

Pooling

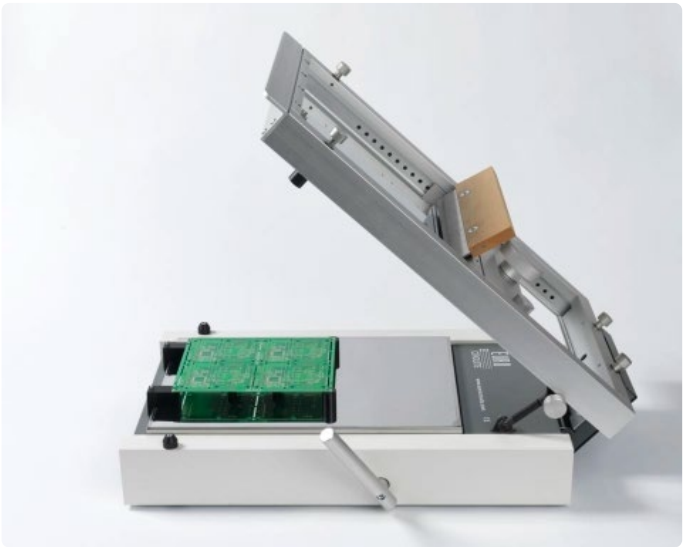
Printplaten worden vervaardigd in een zogenaamd productiepaneel. Hetzelfde productiepaneel kan printplaten met dezelfde specificaties voor verschillende klanten bevatten. Dit samenvoegen van gerelateerde orders wordt pooling genoemd. Pooling bevordert de flexibiliteit en verlaagt de productiekosten.



Figuur 5. Chinese onderdelenleveranciers bij Alibaba.



Figuur 6. LumenPnP van Opulo.



Figuur 7. De eC-stencil-mate printer van Eurocircuits.

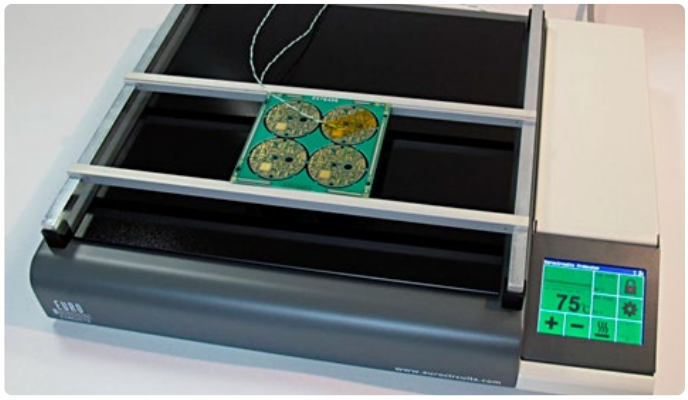
pooling-service (en dat kan vaak nog verder verlaagd worden door te onderhandelen met de reseller). Het is het beste om gesprekken aan te gaan met drie of meer distributeurs voordat je er één kiest die betrouwbaar is en het beste aanbod heeft.
Na een overeenkomst met een van de wederverkopers moeten de componenten naar de PCB pooling-service gestuurd worden. Zorg er daarom voor dat het adres van de fabrikant van de printen goed op het pakket staat. Vraag de verkoper om een foto van het pakket met het adres en het trackingnummer. Dit zorgt ervoor dat alles in orde is en dat de zending gevolgd kan worden. Het is een goed idee om het trackingnummer en de foto van het pakket te delen met het supportteam van de pooling-service. Dit voorkomt vertragingen in de orderverwerking. Een soepel assemblageproces wordt gegarandeerd door effectieve communicatie met zowel de fabrikant als de onderdelenleverancier.

Vijf-sterren-service

Aan de andere kant zijn er bedrijven die je je BoM kunt sturen en die alle onderdelen voor je kopen. Omdat ze veel klanten hebben, kunnen ze in grotere aantallen inkopen dan jijzelf, wat de prijs van de BoM drukt. Deze bedrijven kunnen ook de print voor je bestellen, waardoor er weer een taak van je lijst verdwijnt. Ze kunnen de printen ook voor je assembleren en ze voor je programmeren en testen. Sommige zullen zelfs de printen voor je opslaan en verzenden. Maar daar hangt natuurlijk wel een prijskaartje aan. Ook al is het superhandig, er zit een addertje onder het gras: veel van deze bedrijven accepteren alleen bestellingen vanaf bijvoorbeeld honderd printen, wat misschien net te veel is voor wat je in gedachten had. En ze accepteren wellicht alleen zakelijke klanten, wat betekent dat je eerst een bedrijf moet oprichten.

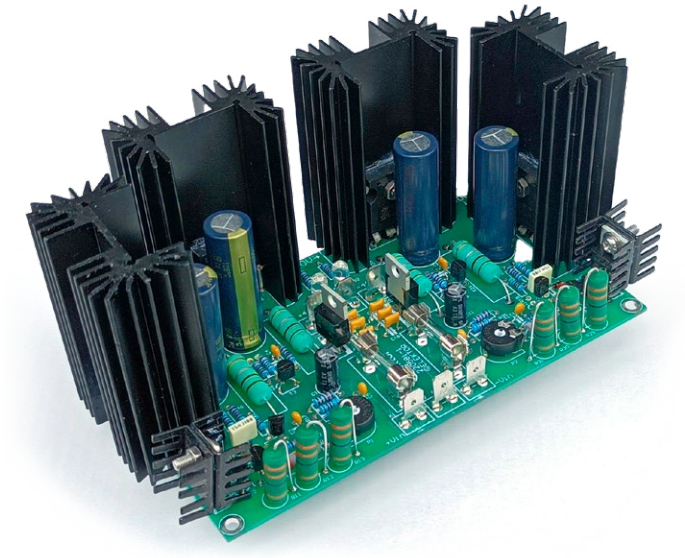
Zelf assembleren?

Zelf printen assembleren kan de goedkoopste oplossing zijn, als je de uren die je erin moet steken niet meetelt. Vooral voor SMD-printen hebben allerlei goedkope assemblagetools het licht gezien, van kleine pick&place-machines, stencilprinters tot reflow-ovens en -platen. Voor een paar duizend euro kun je aan de slag. Maar is het zo'n investering waard als je maar honderd printen te doen hebt? Of reken je op vervolgorders? Zo niet, dan kun je volstaan met een soldeerbout. Koop dan in ieder geval een soldeerdampafzuiger.
Een van de opties om je SMD-assemblage op te zetten is LumenPnP van Opulo (**figuur 6**). Het is een open-source, eenvoudig te installeren, kosteneffectieve pick&place-machine die, en dat is het belangrijkste, niet te veel ruimte inneemt op je werkbank. Dit maakt het een goede keuze voor makers en hobbyisten. Andere open-source opties zijn onder andere OpenPnP en SimplePnP.
Het aanschaffen en gebruiken van deze PnP-oplossingen is niet het einde van het verhaal, maar het begin van een heel nieuw hoofdstuk. Je hebt een volledige setup en procesflow nodig, inclusief de verwerking van soldeerpasta (**figuur 7**), een PCB-voorverwarmer (**figuur 8**), een reflow-oven (**figuur 9**) en een printplaat-testopstelling. Dat klinkt mooi, maar houd er rekening mee dat al deze tools moeten worden ingesteld en geconfigureerd voor je specifieke print. Je moet testruns uitvoeren om er zeker van te zijn dat de configuratie en instellingen correct geïmporteerd worden uit je PCB-ontwerp. Vervolgens voer je de componenten toe aan de feeders en bewaak je het proces om te controleren of de machine



Figuur 8. De eC-pre-heater en eC-fume-cube van Eurocircuits.

Figuur 9. De T-962 infrarood reflow-oven.



Figuur 10. Volledig geassembleerde print: de Elektor ±40 V lineaire spanningsregelaar (kit).

Vergelijking van verschillende PCB-services

Beta Layout: valt op door zijn uitgebreide serviceportfolio voor printplaten. Ze bieden opties voor printplaatproductie, assemblage en zelfs 3D-printen. Beta Layout biedt een snelle en betrouwbare productie, met een breed scala aan beschikbare materialen en afwerkingen. Hun gebruiksvriendelijke website beschikt over een online Gerber-viewer, waardoor het gemakkelijk is om ontwerpen te bekijken en te controleren. Daarnaast biedt Beta Layout een Design Rule Check-tool (DRC) om te helpen bij ontwerpvalidatie.
https://eu.beta-layout.com

Eurocircuits: staat bekend om zijn hoogwaardige printfabricage en -assemblage-service. Ze bieden een breed scala aan PCB-opties, waaronder prototype- en productieruns. Het bedrijf biedt ook een gebruiksvriendelijk online-platform met directe prijzen en een snelle doorlooptijd. De sterke focus op klantenondersteuning en uitgebreide ontwerpregelcontroles zorgen voor optimale resultaten. Eurocircuits biedt ook een visualisatietool waarmee gebruikers hun PCB-ontwerp kunnen bekijken voordat het geproduceerd wordt.
https://eurocircuits.com

JLCPCB: staat bekend om zijn scherpe prijzen en hoogwaardige productie. Ze bieden een breed scala aan PCB-opties, waaronder snelle prototypes en grotere productieruns. JLCPCB biedt een gebruiksvriendelijk online-bestelplatform en ondersteunt meerdere bestandsformaten. Hun uitgebreide kwaliteitscontroleprocessen, zoals geautomatiseerde optische inspectie (AOI), zorgen voor een betrouwbare PCB-fabricage.
https://jlcpcb.com

OSH Park: een community-gerichte PCB-service die bekend staat om zijn opvallende, paarsgekleurde printplaten. Ze zijn gespecialiseerd in de productie van prototype-PCB's en leveren resultaten van hoge kwaliteit met aandacht voor detail. OSH Park heeft een gebruiksvriendelijke website waar gebruikers hun ontwerpen kunnen uploaden en een visuele rendering van de gefabriceerde PCB kunnen bekijken. Ze stellen transparantie voorop en bieden gedeelde projecten voor feedback van de community.
https://oshpark.com

PCBWay: een populaire keuze voor de productie van PCB's in kleine aantallen vanwege de betaalbaarheid en snelle doorlooptijden. Ze bieden een gestroomlijnd online-bestelproces, met real-time prijsberekening en onmiddellijke prijsopgave. PCBWay ondersteunt een verscheidenheid aan PCB-opties, waaronder flexibele en rigid-flex printen. Hun website biedt ook een online Gerber-viewer en ontwerpregel-controle om de nauwkeurigheid van het ontwerp te garanderen.
https://pcbway.com

Samenvatting en aanbevelingen
Het kiezen van de juiste PCB pooling-service hangt af van specifieke projecteisen, budget en gewenste eigenschappen. In de vergelijking tussen de bovengenoemde poolingdiensten, is PCBWay de goedkoopste van het stel als je 10 of minder printen bestelt, maar bij grotere aantallen kost elke andere service ongeveer hetzelfde. JLCPCB komt op de tweede plaats in termen van prijs, met doorgaans een heel aantrekkelijk aanbod. Overweeg factoren zoals prijsstelling, productiemogelijkheden, doorlooptijd, kwaliteitscontrolemaatregelen en klantenondersteuning. Het is ook nuttig om de feedback en beoordelingen van gebruikers voor elke service te bekijken.

Tips voor een beter PCB-ontwerp

Wanneer je streeft naar kosteneffectieve printontwerpen, kan aandacht voor specifieke technische details en industrienormen je aanpak enorm optimaliseren. Hier zijn enkele waardevolle tips en trucs ter overweging.

Spoorbreedte en tussenruimte: volg de IPC-2221 standaard voor richtlijnen [1] over spoorbreedte en de gewenste stroomcapaciteit. Houd voor de tussenruimte tussen sporen, pads of componenten een minimale afstand van 0,2 mm aan voor laagspanningsontwerpen (<50 V) in een standaardomgeving [2].

Fabricagetoleranties: zorg ervoor dat je ontwerp compatibel is met de fabricagetoleranties die door de fabrikant zijn opgegeven. Controleer of de afmetingen, tussenruimte en gatafmetingen voor componenten en vias binnen acceptabele grenzen liggen om fabricageproblemen te voorkomen.

Juiste impedantie: voor hoogfrequente ontwerpen of toepassingen die een specifieke impedantie vereisen, moet je de spoorbreedte en -afstand berekenen op basis van de gewenste karakteristieke impedantie, de diëlektrische constante van het substraat en de koperdikte. Gebruik online calculators of gespecialiseerde softwaretools om de afmetingen van de sporen nauwkeurig te bepalen.

Uitlijning soldeermasker en zeefdruk: zorg voor een juiste uitlijning van het soldeermasker en de zeefdruklaag. Zorg ervoor dat het ontwerp rekening houdt met de vereiste uitlijningstolerantie zoals gespecificeerd door de fabrikant om het uiterlijk en de produceerbaarheid te behouden.

Samenstelling panelen: optimaliseer de productie van kleinere aantallen door meerdere printen op één paneel samen te voegen. Volg hiertoe de richtlijnen van de fabrikant om efficiënte productie en kostenreductie te garanderen.

Footprints van onderdelen: gebruik gestandaardiseerde footprints voor componenten om compatibiliteit te garanderen en productiekosten te verlagen. Controleer of de footprints overeenkomen met de specifieke componenten die je wilt gebruiken en raadpleeg bibliotheken met industriestandaarden of aanbevelingen van de fabrikant van de componenten voor optimale nauwkeurigheid.

Testbaarheid: ontwerp de print [3] met het oog op testbaarheid om de test- en debuggingkosten te verlagen. Zorg waar nodig voor testpunten, toegang voor een probe en ingebouwde zelftestmogelijkheden (BIST). Dit maakt efficiënt testen tijdens productie mogelijk, waardoor de noodzaak voor kostbare reparaties of foutzoeken wordt geminimaliseerd.

goed draait, niet zonder componenten komt te zitten en de componenten op de juiste plaats zet. Dit kan de werklast verminderen in vergelijking met handmatig solderen, maar het kan ook vervelend zijn omdat het een voortdurende controle vereist als je niet teleurgesteld wilt worden na terugkomst van een koffiepauze. Al met al is het een leuke opzet, maar als je deze weg niet wilt bewandelen, kun je altijd nog kiezen voor PCBA-services.
Welke optie je ook kiest, de aanblik van een volledig geassembleerde print (**figuur 10**) is altijd bevredigend!

230477-03

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.

Over de auteurs

Saad Imtiaz (Senior Engineer, Elektor) is een mechatronica-ingenieur met vijf jaar ervaring in embedded systemen, mechatronische systemen en productontwikkeling. Hij heeft met meer dan 200 bedrijven, variërend van startups tot ondernemingen wereldwijd, samengewerkt aan productprototypes en -ontwikkeling. Saad heeft ook gewerkt in de luchtvaartindustrie en heeft een technologische startup geleid. Sinds kort werkt hij bij Elektor en is hij verantwoordelijk voor projectontwikkeling op het gebied van software en hardware.

Gerelateerde producten

- **Voltera V-One Desktop PCB Printer**
  www.elektor.nl/18250
- **Upgraded T-962 Infrared Reflow Oven (Elektor Version)**
  www.elektor.nl/20346
- **Digital Desoldering Station ZD-915**
  www.elektor.nl/20142
- **Weller ESF 120ESD PCB Holder**
  www.elektor.nl/17481

WEBLINKS

[1] IPC-2221-normen toepassen bij het ontwerp van printplaten [PDF]: https://tinyurl.com/ipc2221a
[2] PCB-ontwerp volgens de IPC-7351-norm: https://tinyurl.com/ipc7351
[3] Praktische tips voor de PCB-layout die elke ontwerper moet kennen: https://tinyurl.com/pcbtips

NU BESTELLEN!

SPECTRAN® V6

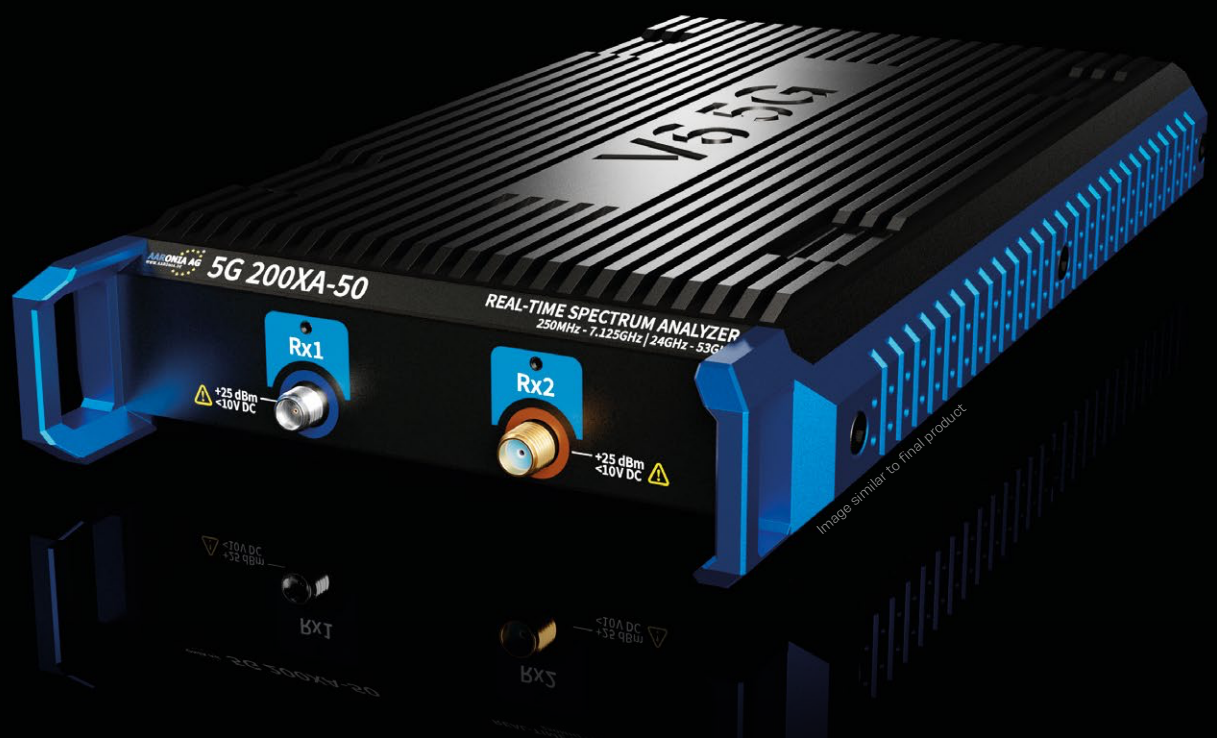
BEYOND REALTIME

REALTIME SPECTRUM ANALYZER **5G**

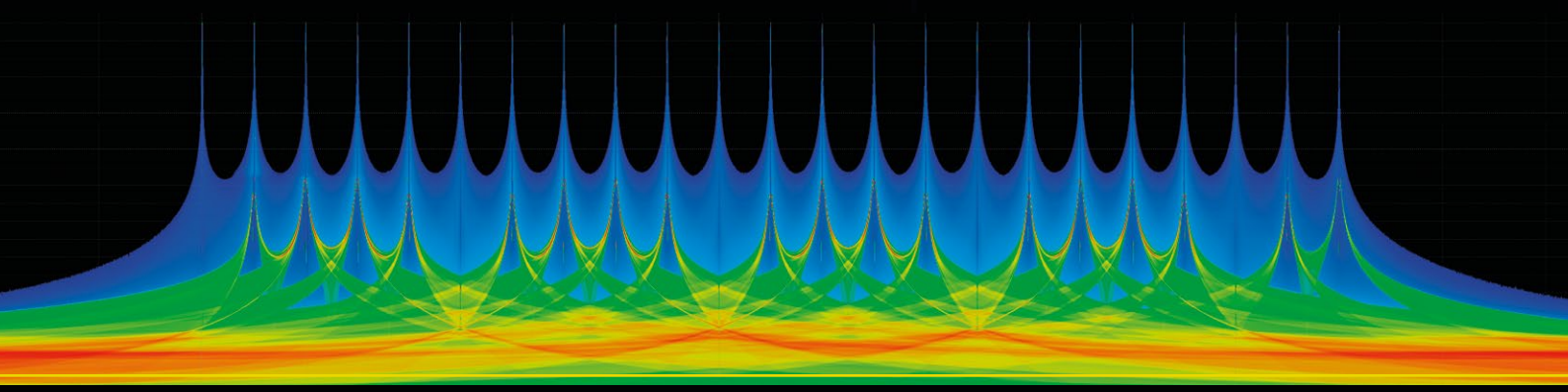
53 GHz USB Real-Time Spectrumanalysator (FR1 & FR2)

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

-170 dBm/Hz DANL (4 dB NF) | Compacte **USB** vormfactor | Inclusief krachtige **RTSA-Suite PRO**-software



Elk apparaat wordt geleverd met 's werelds meest geavanceerde spectrumanalysesoftware **"RTSA-Suite PRO".**



MADE IN GERMANY

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

AARONIA AG
WWW.AARONIA.DE

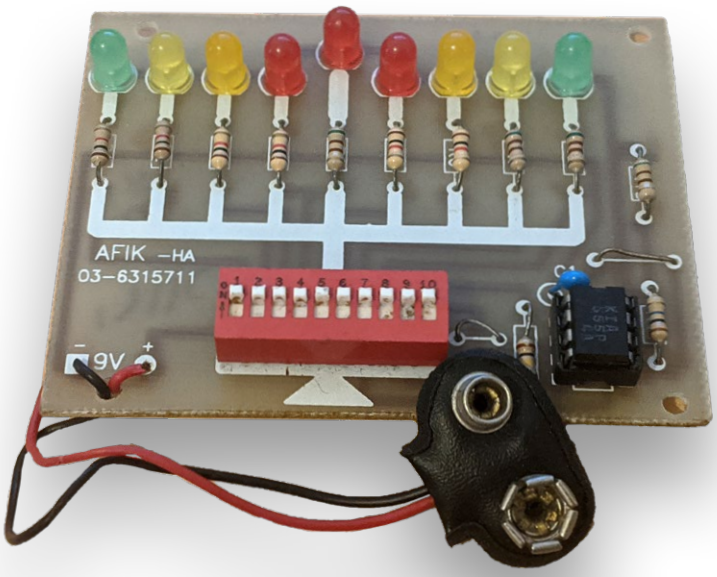
IoT-simulatie vereenvoudigd met Wokwi

vragen van Roberto Armani (Elektor)

Wil je processoren en printen simuleren? Kijk dan eens naar Wokwi, een innovatieve open-source simulator voor embedded systemen en IoT-apparaten. De maker ervan, Uri Shaked, vertelt over de oplossing en over zijn achtergrond en interesses.

Elektor: Allereerst bedankt voor je tijd, Uri. Kun je ons iets vertellen over jezelf, je achtergrond? Waar ben je momenteel gevestigd?
Uri Shaked: Ik ben software-ingenieur en woon in Israël. Als kleuter haalde ik altijd al mijn speelgoed uit elkaar, omdat ik nieuwsgierig was hoe het werkte. In de derde klas maakte ik mijn PC/XT-machine kapot. Ik wilde graag leren hoe ik hem moest repareren, dus kocht mijn tante een boek over MS-DOS voor me. De laatste twee hoofdstukken waren een korte introductie tot QBasic. Ik was verkocht. Vanaf dat moment bleef ik programmeren, elke dag.

Elektor: Waardoor werd je interesse in elektronica gewekt? Was het een specifiek project, een bepaalde cursus, de passie voor elektronica van een familielid of misschien een leraar?
Uri Shaked: Op de basisschool hadden we wekelijks elektronica-les. Het was heel praktijkgericht: we oefenden solderen en assembleerden printen die de leraar ons gaf, terwijl we de basisbeginselen leerden. Ik weet nog hoe leuk ik deze lessen vond en het gevoel van voldoening als ik een voltooid project in handen had (**figuur 1**). Deze labs zorgden inderdaad voor de fundamentele kennis en ervaring en wekten mijn passie.



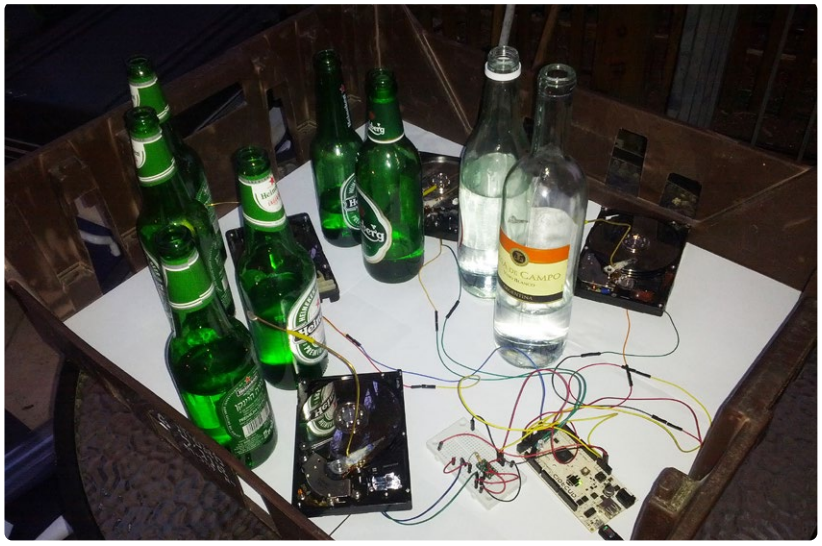
Figuur 1. Mijn Chanoeka Menora-project, dat ik in de vierde klas in elkaar heb gezet en dat nog steeds functioneert!

Elektor: Niemand vergeet zijn 'eerste liefde'. Vertel eens over je eerste 'echte' elektronica-project. Waar werkte je aan en waarom?
Uri Shaked: Toen ik in de achtste klas zat, hing ik veel rond op IRC-chatservers. Op een dag deelde een vriend een link waarin werd uitgelegd hoe je een luidsprekersysteem kon bouwen van oude harde schijven door de actuatormotor van de drives rechtstreeks op een versterker aan te sluiten. Ik was gefascineerd door het idee en besloot er zelf een te bouwen. De geluidskwaliteit was niet perfect, maar met wat vallen en opstaan ontdekte ik dat een zware pot bovenop de drive de geluidskwaliteit en het volume enorm verbeterde (de pot werkte als een soort resonator). Ik eindigde met een stapel potten in de woonkamer, waar ik de oude Pink Floyd-LP van mijn moeder afspeelde. Onnodig te zeggen dat mijn moeder hier niet blij mee was. In de loop der jaren bleven harde schijven terugkomen als thema in mijn projecten, bijvoorbeeld in mijn eerste

MCU-project, een PIC18 persistence-of-vision display met harde schijf of, zoals je kunt zien in **figuur 2**, een van mijn eerste Arduino projecten, een xylofoon [1] met harde schijf die liedjes afspeelde op gerecyclede bierflesjes.

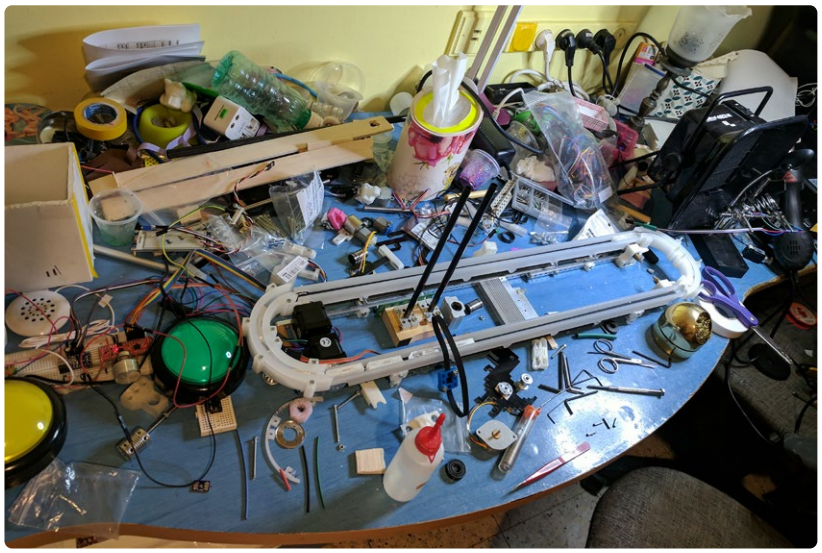
Elektor: Ingenieurs en programmeurs leren veel van hun fouten. Zijn er projecten die op een ramp zijn uitgelopen? Kun je iets vertellen over dat catastrofale project?
Uri Shaked: Dat is beslist mijn GeekCon-project. GeekCon is een weekendevenement waar een groep nerds samenkomt om nutteloze maar coole dingen te bouwen. Het moet misgaan – het motto is immers "als je project niet is mislukt, heb je niet hoog genoeg gemikt." In 2018 probeerden we een robot te bouwen die trompet speelt [2]. We gebruikten een met water gevulde latex handschoen om kunstmatige lippen te maken, een pasta-pot als luchtstroomregelaar en hoog belastbare servomotoren met metalen tandwielen om de kunstvingers te bewegen (**figuur 3**). Een minuut voor de eindpresentatie van het project was er een lek en twee van de servomotoren begaven het. Een epische mislukking. Ik houd niet van mislukkingen, dus ik ging terug naar huis en besteedde de volgende maand aan het repareren van de robot en beloofde hem mee te nemen naar Chrome's jaarlijkse evenement voor ontwikkelaars, Chrome Dev Summit. Uiteindelijk kwam ik erachter hoe ik een robuust vingermechanisme kon maken, maar het lipmechanisme was zo lastig dat ik het niet aan de praat kreeg. Uiteindelijk 'speelde ik vals' door een Raspberry Pi te gebruiken die vooraf opgenomen trompetvoorbeelden afspeelde via het mondstuk. Maar het eindresultaat klonk tenminste goed en mijn robot amuseerde de deelnemers aan Chrome Dev Summit [3].

Elektor: Iemand zei ooit: "Een opgeruimde werkbank is een teken van een zieke geest." Durf je ons een foto van je werkplek te laten zien?
Uri Shaked: Figuur 4 geeft een indruk van mijn werkplek toen ik probeerde een levensechte versie van het spel 'Offline Dinosaur' [4] van Google Chrome te bouwen. Mijn grootste probleem was waar ik alle onderdelen moest bewaren. Ik had meer dan 4.600 dingen, bewaard in 40 verschillende opbergdozen en bijgehouden in verschillende Excel-spreadsheets, die kostbare ruimte in beslag namen in mijn kleine appartement. Vorig jaar verhuisden we en besloot ik om bijna alles weg te geven aan een lokale *maker space*. Tegenwoordig gebruik ik voornamelijk virtuele onderdelen. Ik heb nog steeds een paar Raspberry Pi's, een Saleae Logic Analyzer en een kleine verzameling MCU-board (ESP32, STM32, Pi Pico en Arduino) waarmee ik het werkelijke gedrag van een chip kan vergelijken met het gesimuleerde gedrag.

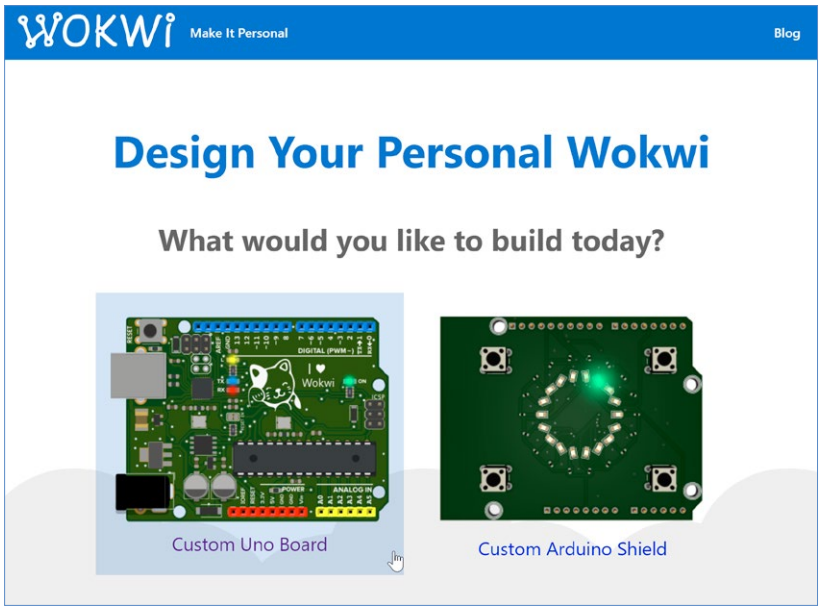


Figuur 2: Hard-disk-xylofoon.

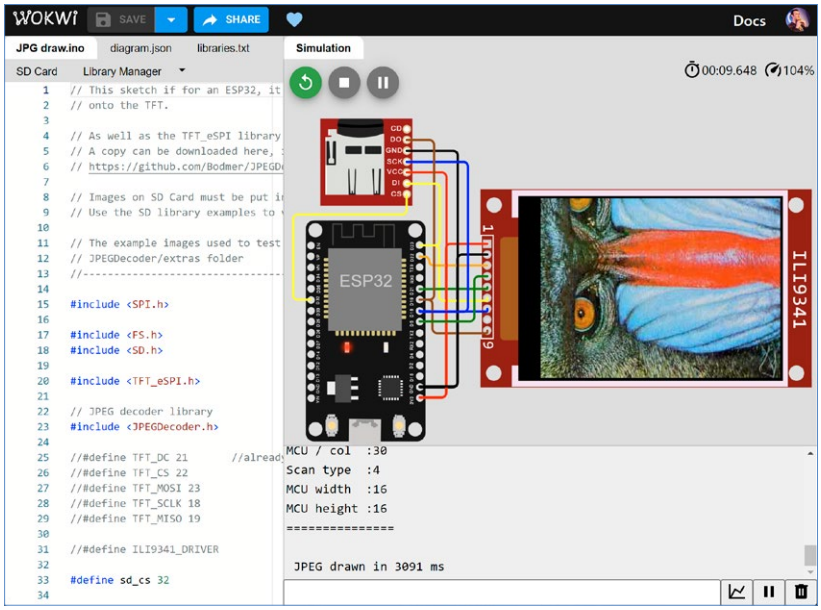
Figuur 3. Mijn vriend Avi met onze trompetrobot, een paar seconden voordat hij explodeerde…



Figuur 4. Mijn opgeruimde en nette werkplek…



Figuur 5. De oude homepage van Wokwi.



Figuur 6. Wokwi op dit moment.

Elektor: Als je beginners een paar 'tips en trucs' zou moeten geven voor het inrichten van een goede werkplek, wat zou je dan zeggen?
Uri Shaked: Zorg voor een goede voeding!

Elektor: Oké, op naar Wowki. Wat is het? Waar komt de naam vandaan? Wat bracht je ertoe om het te maken?
Uri Shaked: Wokwi is een simulator voor embedded systemen en IoT-apparaten. Er is een gratis online-versie en ook een Visual Studio Code-plugin. Wokwi kan ESP32, Raspberry Pi Pico, STM32, Arduino en een heleboel andere microcontrollers simuleren, evenals een grote verscheidenheid aan invoer- en uitvoerapparaten: LC-displays, sensoren, motoren, LED's, knoppen, luidsprekers, potentiometers en meer. Zoals je kunt zien in figuur 5, is Wokwi begonnen als een service waarmee je iegen Arduino-boards [5] kunt maken met een eenvoudige drag-and-drop interface. Begin met een boardsjabloon, voeg periferie toe (LED's, sensoren enzovoort), plaats ze op het board en wij zetten je ontwerp om in een print, produceren en assembleren die en verzenden het. Ik begon te bloggen over Arduino om de boodschap te verspreiden en ik wilde echt interactieve, live demo's in mijn artikelen opnemen. Ik kon geen goede oplossing vinden voor het gemakkelijk delen van Arduino-projecten en het simuleren ervan op het web, dus begon ik te werken aan een open-source JavaScript-bibliotheek die de ATmega328P-microcontroller kon simuleren. En de rest is geschiedenis. In **figuur 6** kun je zien hoe het er nu uitziet. Wat de naam Wokwi betreft, was ik op zoek naar een kort, makkelijk uit te spreken woord dat nog geen betekenis had.

Elektor: Wie gebruikt het? Is het helemaal gratis?
Uri Shaked: Ongeveer 55% van de gebruikers zijn hobbyisten, 35% zijn studenten en leraren (zowel universiteiten als middelbare scholen), en 10% zijn professionele firmware-engineers. Enkele populaire use cases zijn het maken van prototypes van IoT-systemen (MQTT, Blynk, Thingsboard, IBM Cloud), online cursussen en workshops (bijvoorbeeld de cursus *Making Embedded Systems*), en we zien een groeiende interesse vanuit de Embedded Rust-gemeenschap. Wokwi heeft een gratis versie en een betaalde versie (*The Club*). De gratis versie is zeer krachtig en heeft dezelfde simulatiemogelijkheden als de betaalde versie. De betaalde versie voegt het uploaden van bestanden en bibliotheken, lokale netwerken voor de ESP32 en de mogelijkheid om privéprojecten (unlisted) op te slaan toe.

Elektor: Welke onderdelen of aspecten van het ontwikkelen en leiding geven aan het Wokwi-project vormden de grootste uitdaging?
Uri Shaked: Wokwi wil complexe systemen vereenvoudigen en een goede gebruikerservaring bieden. In plaats van compilers te moeten downloaden en installeren, drivers voor besturingssystemen te moeten installeren, te moeten vechten met rechten, defecte USB-kabels en gammele breadboardverbindingen, klik je gewoon op een knop. Je code compileert op 'magische' wijze en je kunt het resultaat bekijken in je webbrowser. Om zo'n 'het werkt gewoon'-ervaring te creëren, moeten we veel complexiteit zelf oplossen. We stellen de compiler-toolchain in de cloud in voor meerdere platformen (bijvoorbeeld Rust, Arduino, esp-idf, verilog), zorgen ervoor dat het lekker snel werkt (we draaien ongeveer 2,3 miljoen compilaties per maand) en jagen op mysterieuze bugs. Vorige

maand ben ik bijvoorbeeld een dag bezig geweest om uit te zoeken waarom het gebruik van een specifieke bibliotheek in een Arduino-project ervoor zorgde dat de server bleef hangen. Het bleek dat er een probleem was met de Arduino CLI [6] die ervoor zorgde dat de server bleef hangen wanneer hij die bibliotheek probeerde te installeren. Het bieden van een goede gebruikerservaring betekent ook dat we gebruikers moeten helpen uit te zoeken waarom de code niet werkt zoals ze verwachten. Ik heb het gevoel dat we nog een lange weg te gaan hebben, maar functies zoals de virtuele Logic Analyzer en de onlangs toegevoegde Pin Function Dump-functie zijn zeker een stap vooruit.

Elektor: Kun je ons iets vertellen over je favoriete 'Featured Simulation Project'?

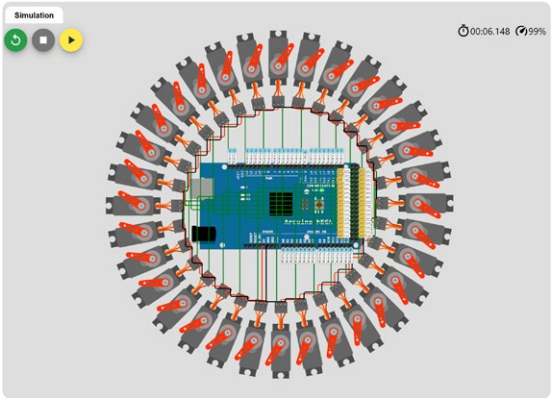
Uri Shaked: Het is lastig een keuze te maken, maar als ik er één zou moeten kiezen zou dat *32 Servos Dancing* [7] zijn, zoals te zien in **figuur 7** – een Arduino Mega die 32 servo's bestuurt en hun armen animeert. Het project is meer kunst dan nuttig. En dat vind ik zo leuk aan dit project. Om het in het echt te bouwen zou je een stevige voeding nodig hebben en een paar honderd euro voor de onderdelen moeten uitgeven, maar in de simulator is het een fluitje van een cent. Klik gewoon op *Play* en je ziet het in actie. Om de boel wat op te leuken is zelfs het schema voor dit project gegenereerd door de Arduino-code. Kijk eens naar de `GenerateDiagram()`-functie, die trigonometrische functies gebruikt om de servo's te plaatsen. Er wordt een JSON-bestand afgedrukt, dat je vervolgens in *diagram.json* in je Wokwi-project kunt plakken, waardoor je zowel de schakeling als de visuele weergave ervan krijgt. Dat noem ik nog eens innovatieve engineering! Over creativiteit van gebruikers gesproken: Wokwi biedt een *Custom Chips API* [8], waarmee je nieuwe simulatiemodellen kunt coderen voor onderdelen die nog niet bestaan in de simulatie. De API biedt een framebuffer-interface, waarmee je je eigen displays kunt maken (LCD, e-papier enzovoort). Wat ik niet had verwacht is dat gebruikers hun eigen oscilloscoop zouden maken met behulp van de framebuffer-interface, zoals te zien in **figuur 8**.

Elektor: De ESP32 is op zichzelf al een behoorlijk complexe module. Vertel ons eens hoe je de ESP32 in je project hebt geïntegreerd. Was dat moeilijk?

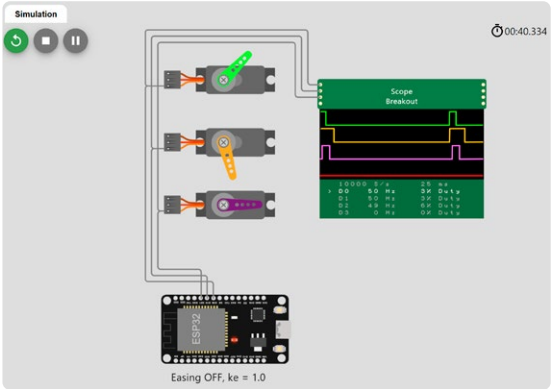
Uri Shaked: Wow, dat was een moeilijke. De ESP32 gebruikt de Xtensa-instructieset, die meer dan 250 instructies bevat. De eerste stap was het schrijven van code om elk van die instructies te decoderen en te simuleren, wat uiteindelijk in ongeveer 4500 regels code resulteerde. Daarna maakte ik een GDB-bridge (zodat ik de code kon debuggen die in de simulator draaide) en begon ik te werken aan de periferie van de chip. Mijn eerste doel was om voorbij de ROM en bootloader te komen en de *Hello World*-applicatie te draaien vanaf ESP-IDF. Na het implementeren van UART, SPI, de timers (TIMG) en wat andere obscure periferie (DPORT, EFUSE), was ik eindelijk in staat om de eerste bruikbare uitvoer van de seriële console van de simulator te krijgen. De grootste uitdaging was echter het simuleren van WiFi. In tegenstelling tot andere delen van de chip, is de WiFi-periferie helemaal niet gedocumenteerd en de broncode van de drivers is niet beschikbaar. Het kostte weken van intensieve reverse engineering [9] om erachter te komen welke registers de WiFi-radio aansturen en hoe deze correct te simuleren. Het harde werk heeft echter zijn vruchten afgeworpen – de ESP32 is de populairste chip op Wokwi aan het worden en Espressif, het bedrijf achter de ESP32, steunt het project van harte. Hun ingenieurs zetten vaart achter de ondersteuning van Rust, gebruiken Wokwi in hun trainingen en workshops, en bevelen het zelfs aan op conferenties voor professionals.

Elektor: Vertel ons eens over de reactie van gebruikers op Wowki. Wat doe je met hun feedback?

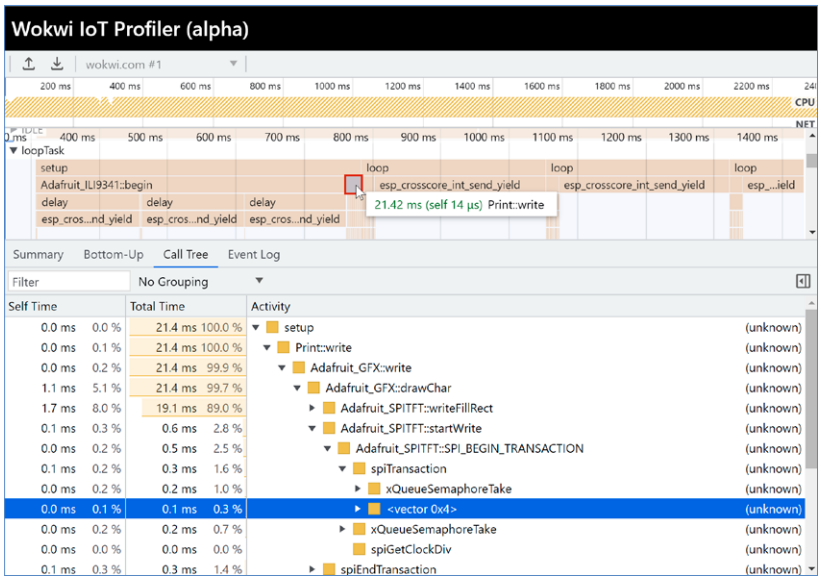
Uri Shaked: Onze gebruikers zijn over het algemeen blij met de simulator, die ze veel tijd bespaart. Maar ze vragen ook altijd om meer en meer functies, veel meer



Figuur 7. 32 dansende servo's, aangestuurd door een Arduino Mega-board.



Figuur 8. De Scope-chip toont servosignalen in real time.



Figuur 9. Wokwi Embedded Profiler.

▲

Figuur 10. De Floppy Disks, met een close-up van de elektronica (twee EEPROM's, write-lock soldeerjumpers en een indicatie-LED).

dan ons kleine team aankan. Om te helpen focussen op wat echt belangrijk is voor gebruikers, heb ik de 'Vote for new features' -pagina [10] geopend. Iedereen kan nieuwe functies voorstellen en mensen kunnen met hun geld stemmen op functies die voor hen belangrijk zijn. Het helpt ons prioriteiten te stellen en het is ook een geweldige manier voor gebruikers om te zien wat er aan zit te komen.

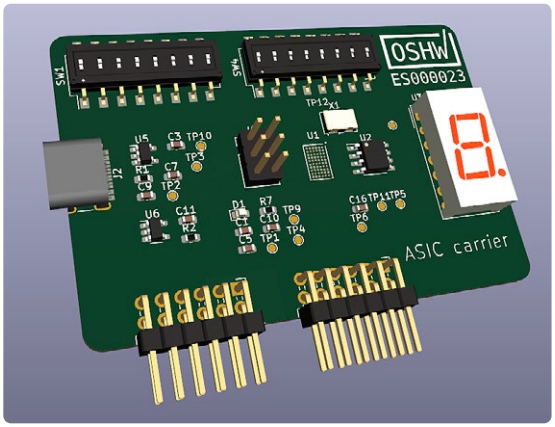
Elektor: Waar wil je Wokwi hebben in de komende zes tot twaalf maanden?
Uri Shaked: Ik zou graag zien dat Wokwi meer aandacht krijgt van professionele gebruikers. Eerder dit jaar heb ik Wokwi uitgebracht voor Visual Studio Code. Hiermee kun je de simulatie direct in je IDE uitvoeren en je code veel sneller itereren. Ik zie nu al dat Rust-ontwikkelaars het gebruiken om hun productiviteit te verhogen. Wokwi kan ook integreren met de debugger in VS Code en, in tegenstelling tot echte hardware, kun je met Wokwi een willekeurig aantal breakpoints instellen. Ik werk nu aan een nieuwe embedded profiler – zie **figuur 9**. Wokwi traceert je code terwijl die draait in de simulator. Je kunt zien welke functies worden aangeroepen, in welke volgorde, en hoeveel tijd de microcontroller in elke functie doorbrengt. Ik ben ook van plan om de ESP32-lijn uit te breiden (met ESP32-H2, ESP32-P4), nieuwe STM32-chips toe te voegen en misschien contact op te nemen met andere chipsmakers en ook hun microcontrollers toe te voegen. Tot slot zou ik graag zien dat Wokwi wordt gebruikt in CI-omgevingen (continuous integration). Het idee is om je embedded code bij elke commit te testen. Dit is veel eenvoudiger op te zetten en op te schalen met Wokwi, vergeleken met het onderhouden van een fysieke hardware-setup. Ik gebruik intern al een CI-setup om er zeker van te zijn dat kritieke componenten, zoals de ESP32 WiFi, niet defect raken bij updates van de code en nieuwe ESP-IDF releases, en werk nu aan een CLI (command-line interface) voor Wokwi, om de simulator gemakkelijker te kunnen gebruiken binnen GitHub-acties.

Elektor: Je lijkt zowel een kunstenaar als een ingenieur te zijn, zoals velen kunnen zien bij het lezen van je post *'A Practical Guide to Designing PCB Art'* [11]. Vertel ons eens over je creatieve benadering van kunst en elektronica.
Uri Shaked: Samen met vrienden planden we een slimme naambadge voor een conferentie. Na het bespreken van hardware add-ons voor de badge, zei iemand dat het ook cool zou zijn als de deelnemers kleine spelletjes voor de badge zouden kunnen schrijven en een soort app-store zouden hebben om hun creaties te delen. Op dat moment kwam er een idee in me op. We hebben geen online app-store nodig – in plaats daarvan kunnen we een hardware add-on maken met een kleine EEPROM-chip. De deelnemers schrijven hun apps en games op de add-on en geven deze vervolgens weg aan hun vrienden, zodat zij de code kunnen kopiëren naar hun badge. Zo werd de Floppy Disk add-on [12] geboren. Toen ik eenmaal het idee had, was het een kwestie van de afmetingen van een floppy disk opzoeken, een schets maken met Inkscape en beslissen welke PCB-layer te gebruiken voor elk element: zeefdruk voor de sticker, vertind koper (HASL) voor de metalen schuif en koper met een soldeermasker voor het HD-symbool. Ik heb het schema en de layout in KiCad gedaan, en het resultaat – wel, **figuur 10** spreekt voor zich.

Elektor: Staan er nog andere belangrijke projecten op stapel?
Uri Shaked: Tiny Tapeout. Ik werk hier samen met Matt Venn aan en ons doel is om silicium op maat betaalbaarder en toegankelijker te maken. Je kunt een digitaal ontwerp in Verilog of Wokwi gebruiken om een ontwerp te maken van individuele logische poorten, vervolgens je ontwerp 'hard maken' met

OpenLane (een open -source digitale ontwerp-workflow) en je ontwerp indienen voor opname in onze chip. Wij nemen je ontwerp, samen met honderden ontwerpen van anderen, en combineren alles tot een enkel chipontwerp. Vervolgens produceren we de chips, zetten ze op een PCB en sturen je een fysieke versie van je ontwerp. De print die je ziet in **figuur 11** heeft een set DIP-schakelaars om een ontwerp te selecteren, zodat je ook kunt spelen met de andere ontwerpen in de chip. We moedigen dat zelfs aan – alle ontwerpen zijn open source en we stellen een datasheet samen met alle documentatie. We beginnen nu samen te werken met universiteiten om Tiny Tapeout naar hun studenten te brengen en lesmateriaal te maken om hobbyisten en silicium-enthousiastelingen te helpen leren over halfgeleiders en digitaal ontwerpen. Eerder dit jaar hebben we Siliwiz uitgebracht, een open source-app die een visuele layout-editor, DRC-engine en SPICE-simulatie integreert, allemaal in een browser. Er is nog veel meer te vertellen over Tiny Tapeout, de gemeenschap en de creatieve ontwerpen die onze gebruikers samenstellen, maar dat is een verhaal voor een andere keer!

vertaling: Jelle Aarnoudse – 230366-03



Figuur 11. Tiny Tapeout breakout-print (voorlopige 3D-weergave).

Over Uri Shaked

Uri Shaked is al heel lang een maker. Hij werkt momenteel aan Wokwi, een online simulatieplatform voor IoT en embedded systemen, en aan Tiny Tapeout [13], dat 'eigen' ASIC's betaalbaar en toegankelijk maakt. Zijn projecten en blog zijn te vinden op [14], met veel tech talks en video-interviews [15].

Over de auteur

Roberto Armani is een elektrotechnisch ingenieur met meer dan vijfendertig jaar ervaring in verschillende sectoren. Voordat hij als Senior Editor het Elektor-team kwam versterken, deed hij kennis en ervaring op in de computerindustrie, elektronische beeldvorming, telecommunicatie, materiaaltestapparatuur en webpublicatie. Naast elektronica hoort (en zingt) hij graag klassieke muziek en maakt hij 'hoge' wandelingen in de bergen.

WEBLINKS

[1] Hard-Drive Xylophone Arduino-project: https://youtu.be/dw9U0WxtK9c
[2] Experimenten met een gerobotiseerde trompet: https://bit.ly/3N2FfCz
[3] Trompet-demo op de Chrome Dev Summit: https://youtu.be/PEVAczB9uUQ
[4] Elektronica met een persoonlijk tintje: https://blog.wokwi.com/wokwi-electronics-with-a-personal-touch/
[5] Real-life versie van de "Offline Dinosaur Game" van Google Chrome: https://bit.ly/3qgsifz
[6] CLI-problemen met Arduino: https://github.com/arduino/arduino-cli/issues/2135
[7] Dancing Servos Project: https://wokwi.com/projects/305336312628511297
[8] Custom Chips API: https://docs.wokwi.com/chips-api/getting-started
[9] "Reversing the ESP32 WiFi" video: https://youtu.be/XmaT8bMssyQ
[10] Wowki's Feature Voting Page: https://wokwi.com/features
[11] A Practical Guide to Designing PCB Art: https://blog.wokwi.com/a-practical-guide-to-designing-pcb-art/
[12] Floppy Disk add-on: https://github.com/urish/floppy-disk-sao
[13] Tiny Tapeout: https://tinytapeout.com
[14] Webpagina met Uri's projecten: https://urish.org/#projects
[15] Uri's video's en interviews: https://urish.org/#talks

Doe mee aan de STM32 Wireless Innovation CONTEST

STM32

Innoveer en win! € 5000 aan prijzen!

De STM32 Wireless Innovation Design Contest geeft je de kans om je creativiteit en ontwerpvaardigheden te tonen door spannende draadloze toepassingen te maken met behulp van de krachtige ontwikkel- en evaluatieboards van STMicroelectronics.

Eerste prijs
€ 2500

Tweede prijs
€ 1500

Derde prijs
€ 1000

Hoe neem je deel

1. Ga naar www.elektormagazine.com/st-contest.
2. Kies een van de beschikbare boards.
3. Creëer een innovatief project en documenteer het.
4. Upload je project.

Uiterste inzenddatum: 19 februari 2024.

De boards

NUCLEO-WBA52CG

NUCLEO-WBA52CG is een draadloos Bluetooth® Low Energy- en ultra-low-power-board met een krachtige en ultra-low-power radio die voldoet aan de Bluetooth® Low Energy SIG-specificatie v5.3. De ondersteuning voor ARDUINO® Uno V3 connectiviteit en de ST morpho headers maken eenvoudige uitbreiding van de functionaliteit van het STM32 Nucleo open ontwikkelplatform met een ruime keuze aan gespecialiseerde shields mogelijk.

Kenmerken

- Ultra-low-power draadloze STM32WBA52CG microcontroller gebaseerd op de Arm® Cortex®-M33 kern, met 1 Mbyte flashgeheugen en 128 kbyte SRAM in een UFQFPN48-behuizing
- MCU RF-kaart (MB1863):
  - 2,4 GHz RF-zendontvanger met ondersteuning voor Bluetooth® specificatie v5.3
  - Arm® Cortex® M33 CPU met TrustZone®, MPU, DSP en FPU
  - Geïntegreerde PCB-antenne
- Drie gebruikers-LED's
- Drie gebruikersdrukknoppen en een resetdrukknop
- Aanwezige connectoren:
  - USB Micro-B
  - ARDUINO® Uno V3-uitbreidingsconnector
  - ST morpho headers voor volledige toegang tot alle STM32 I/O's
- Flexibele voedingsopties: ST-LINK USB VBUS of externe bronnen
- Ingebouwde STLINK-V3MODS debugger/programmer met USB-re-enumeratie mogelijkheid: massaopslag, virtuele COM-poort en debug-poort
- Uitgebreide gratis softwarebibliotheken en voorbeelden beschikbaar in het STM32CubeWB MCU-pakket
- Ondersteuning van een groot aantal geïntegreerde ontwikkelomgevingen (IDE's) waaronder IAR Embedded Workbench®, MDK-ARM en STM32CubeIDE.

STM32WB5MM-DK

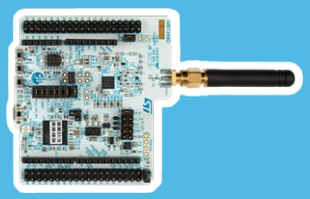
Het STM32-device is een draadloos multi-protocol device met een krachtige radio met ultralaag vermogen dat voldoet aan de Bluetooth® Low Energy (BLE) SIG-specificatie v5.2 en IEEE 802.15.4-2011.

Kenmerken

- STM32WB5MMG (1-Mbyte flashgeheugen, 256-kbyte SRAM, in module RF-behuizing) met:
  - Dual-core 32-bit (Arm® Cortex®-M4 en speciale M0+ CPU voor real time radio layer)
  - 2,4 GHz RF-zendontvanger met ondersteuning voor Bluetooth® specificatie V5.2, 802.15.4 met Zigbee®, Thread® en propriëtaire protocollen
- 0,96-inch 128x64 OLED-display
- 128 Mbit Quad-SPI NOR Flashgeheugen
- Temperatuursensor
- Versnellingsmeter/gyroscoopsensor
- time-of-flighten gebarendetectiesensor
- Digitale microfoon
- RGB-LED
- Infrarood LED
- 3 drukknoppen (2 gebruikers en 1 reset) en 1 tiptoets
- Aanwezige connectoren:
  - STMod+
  - ARDUINO® Uno V3-uitbreidingsconnector
  - USB-gebruiker met Micro-B-connector
  - TAG10 10 pins formaat
- Flexibele voedingsopties: ST-LINK/V2-1 USB-aansluiting, 5 V geleverd door ARDUINO® of externe connector, USB-oplader of USB-voeding
- Ingebouwde ST-LINK/V2-1 debugger/programmer met USB-re-enumeratie mogelijkheid: Virtuele COM-poort en debug-poort
- Uitgebreide gratis softwarebibliotheken en voorbeelden beschikbaar in het STM32CubeWB MCU-pakket
- Ondersteuning van een groot aantal geïntegreerde ontwikkelomgevingen (IDE's) waaronder IAR Embedded Workbench®, MDK-ARM en STM32CubeIDE.

NUCLEO-WL55JC

Het NUCLEO-WL55JC STM32WL Nucleo-64-board biedt een betaalbare en flexibele manier voor gebruikers om nieuwe concepten uit te proberen en prototypes te bouwen met de STM32WL-serie microcontroller, door te kiezen uit de verschillende combinaties van prestaties, stroomverbruik en functies.



Kenmerken

- STM32WL55JC microcontroller multiprotocol LPWAN dual-core 32-bit (Arm® Cortex®-M4/M0+ op 48 MHz) in UFBGA73-behuizing met:
  - MCU met ultra laag stroomverbruik
  - RF-zendontvanger (150 MHz tot 960 MHz frequentiebereik) die LoRa®, (G)FSK-, (G)MSKen BPSK-modulaties ondersteunt
  - 256 kbyte flashgeheugen en 64 kbyte SRAM
- 3 gebruikers-LED's
- 3 gebruikersknoppen en 1 reset-drukknop
- 32,768 kHz LSE-kristaloscillator
- 32 MHz HSE-on-board oscillator
- Aanwezige connectoren:
  - USB met Micro-B
  - MIPI® debug-connector
  - ARDUINO® Uno V3-uitbreidingsconnector
  - ST morpho uitbreidingsheaders voor volledige toegang tot alle STM32WL I/O's
- Inclusief SMA-antenne
- Flexibele voedingsopties: ST-LINK, USB VBUS of externe bronnen
- Ingebouwde STLINK-V3 debugger/programmer met USB-re-enumeratie mogelijkheden: massaopslag, virtuele COM-poort en debug-poort
- Uitgebreide gratis softwarebibliotheken en voorbeelden beschikbaar in het STM32CubeWL MCU-pakket
- Ondersteuning van een groot aantal geïntegreerde ontwikkelomgevingen (IDE's) waaronder IAR Embedded Workbench®, MDK-ARM en STM32CubeIDE.
- Geschikt voor snel prototypenvan eindknooppunten op basis van LoRaWAN®, Sigfox™, wM-Bus en vele andere propriëtaire protocollen
- Volledig open hardware platform

www.elektormagazine.com/st-contest

Een gids voor puristisch programmeren (deel 3)

CMSIS-headers, automatisch testen en een webserver

Sergey Lyubka (Ierland)

In de eerste twee delen van deze gids hebben we geleerd hoe we toegang krijgen tot de controllerpinnen, de systeemklok en de UART, en hoe we onze eerste firmware-voorbeelden kunnen bouwen met linker scripts en Makefiles. In dit laatste deel van de serie zullen voorgedefinieerde headers en bibliotheken ons leven veel gemakkelijker maken. We zullen een webserver programmeren en zien hoe het bouwen en testen van dergelijke complexere firmware kan worden geautomatiseerd.

Noot van de redactie: deze gids is een levend en groeiend document op GitHub [1].

CMSIS-headers van de chipsbakker

In de vorige artikelen [2][3] hebben we de firmware ontwikkeld met alleen datasheets, een editor en een GCC-compiler. We hebben periferie-structuurdefinities handmatig gemaakt met behulp van datasheets.

Nu je weet hoe het allemaal werkt, is het tijd om CMSIS-headers te introduceren. Dit zijn headerbestanden met alle definities, gemaakt en beschikbaar gesteld door de MCU-leverancier. Ze bevatten definities voor de interne blokken en periferie van die MCU, en zijn dus vrij groot.

CMSIS staat voor *Common Microcontroller Software Interface Standard* en is een gemeenschappelijke basis voor MCU-fabrikanten om perifere API's te specificeren. Aangezien CMSIS een ARM-standaard is en CMSIS-headers worden geleverd door de MCU-fabrikant, vormen zij de standaard. Daarom heeft het gebruik van headers van de leverancier de voorkeur boven het handmatig schrijven van definities.

We onderscheiden twee groepen CMSIS-headers:

- ARM Core CMSIS-headers. Deze beschrijven de ARM-core en zijn door ARM gepubliceerd op GitHub [4].
- CMSIS-headers van MCU-leveranciers. Deze beschrijven MCU-periferie en worden gepubliceerd door de MCU-leverancier. In ons geval publiceert ST ze op [5].

We kunnen die headers ophalen met een eenvoudig stukje Makefile-code:

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

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

Het ST CMSIS-package bevat ook opstartbestanden voor al hun MCU's. We kunnen deze gebruiken in plaats van de met de hand geschreven *startup.c*-bestanden. Het ST-opstartbestand roept de `SystemInit()`-functie aan, zodat we die definiëren in *main.c*.

Laten we nu onze API-functies in *hal.h* vervangen door CMSIS-definities en de rest van de firmware intact laten. Verwijder alle perifere API en definities uit *hal.h* en laat alleen de standaard C-includes, de CMSIS-include van de leverancier, de definities voor PIN, BIT, FREQ en de `timer_expired()`-helperfunctie over.

Als we proberen om de firmware opnieuw te bouwen – `make clean build` – dan zal GCC falen en klagen over het ontbreken van `systick_init()`, `GPIO_MODE_OUTPUT`, `uart_init()` en `UART3`. Laten we die toevoegen met behulp van STM32 CMSIS-bestanden. Laten we beginnen vanaf `systick_init()`. ARM core- CMSIS-headers bieden een `SysTick_Config()`-functie die hetzelfde doet, dus die zullen we gebruiken.

Vervolgens komt de functie `gpio_set_mode()`. De *stm32f429xx.h*-header heeft een `GPIO_TypeDef` structuur, identiek aan onze `struct gpio`. Laten we deze gebruiken:

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

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

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

De functies `gpio_set_af()` en `gpio_write()` zijn ook triviaal – vervang gewoon `struct gpio` door `GPIO_TypeDef` – dat is alles. Vervolgens komt UART. Er is een `USART_TypeDef`, en defines voor USART1, USART2, USART3. Laten we die gebruiken:

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

Verander in `uart_init()` en de andere UART-functies `struct uart` in `USART_TypeDef`. De rest blijft hetzelfde!
En we zijn klaar. Herbouw en reflash de firmware. De LED knippert, de UART toont de uitvoer. Gefeliciteerd, we hebben onze firmware aangepast om CMSIS-headerbestanden van de leverancier te gebruiken. Laten we nu de repository een beetje reorganiseren door alle standaard-bestanden naar de *include*-directory te verplaatsen en Makefile bij te werken om GCC hiervan op de hoogte te brengen:

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

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

Laten we ook CMSIS header pulling toevoegen als afhankelijkheid voor de binary:

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

We houden een projectsjabloon over dat kan worden hergebruikt voor toekomstige projecten. Je kunt de volledige broncode van het project vinden in de projectmap *step-5-cmsis* [6].

Klokken instellen

Na het opstarten draait de CPU van de Nucleo-F429ZI op 16 MHz. De maximale frequentie is 180 MHz. Merk op dat de systeemklokfrequentie niet de enige factor is waar we op moeten letten. Periferie is aangesloten op verschillende bussen, APB1 en APB2, die verschillend geklokt zijn. Hun kloksnelheden worden geconfigureerd door de frequentie-prescalerwaarden die zijn ingesteld in de RCC (de RCC-controller beheert systeemklokken en klokken van periferie). De hoofd-klokbron van de CPU kan ook verschillend zijn – we kunnen een externe kristaloscillator (HSE) of een interne oscillator (HSI) gebruiken. In ons geval gebruiken we HSI. Als de CPU instructies uit het flashgeheugen uitvoert, wordt de leessnelheid van het flashgeheugen (die ongeveer 25 MHz is) een knelpunt als de CPU sneller geklokt wordt. Er zijn verschillende trucs die kunnen helpen. Instructie-prefetch is er één van. Ook kunnen we de flash-controller een aanwijzing geven over hoe snel de systeemklok is: die waarde wordt flash latency genoemd. Voor een systeemklok van 180 MHz is de waarde `FLASH_LATENCY` 5. Bits 8 en 9 in de flash-controller schakelen instructie- en datacaches in:

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

Het klok-bronsignaal (HSI of HSE) doorloopt een stuk hardware dat PLL wordt genoemd en dat de bronfrequentie vermenigvuldigt met een bepaalde waarde. Vervolgens wordt een reeks frequentiedelers gebruikt om de systeemklok en de APB1- en APB2-klokken in te stellen. Om de maximale systeemklok van 180 MHz te verkrijgen, zijn meerdere waarden van PLL-delers en APB-prescalers mogelijk. Paragraaf 6.3.3 van het referentiehandboek van de STM32F4xx-controller [7] vertelt ons de maximale waarden voor de APB1-klok (≤45 MHz) en de APB2-klok (≤90 MHz). Dat verkleint de lijst met mogelijke combinaties. Hier hebben we de waarden handmatig gekozen. Merk op dat gereedschappen zoals CubeMX het proces kunnen automatiseren en het gemakkelijk en visueel kunnen maken.

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

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

Listing 1. Klok-initialisatie.

[zie *https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/blob/main/steps/step-6-clock/sysinit.c*]

```
uint32_t SystemCoreClock = SYS_FREQUENCY;

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

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

Nu zijn we klaar voor een eenvoudig algoritme om de klok in te stellen voor CPU en perifere bussen. Dat kan er als volgt uitzien:

- optioneel FPU inschakelen
- flash latency instellen
- kies een klokbron en PLL-, APB1- en APB2-prescalers
- configureer RCC door de betreffende waarden in te stellen
- verplaats de klokinitialisatie naar een functie `SystemInit()` in een apart bestand *sysinit.c*, die automatisch wordt aangeroepen door de opstartcode

Zie **listing 1**!
We moeten ook *hal.h* veranderen – in het bijzonder de UART-initialisatiecode. Verschillende UART-controllers draaien op verschillende bussen: UART1 draait op de snelle APB2, en de andere UART's draaien op de langzamere APB1. Bij een standaard 16MHz-klok maakt dat geen verschil. Maar bij hogere snelheden kunnen APB1 en APB2 verschillend geklokt zijn, dus moeten we de berekening van de baudrate voor de UART aanpassen. Zie **listing 2**.
Herbouw en flash opnieuw; ons board draait nu op zijn maximale snelheid van 180 MHz! De volledige broncode van het project is te vinden in de *step-6-clock* projectmap [8].

Webserver met apparaatdashboard

De Nucleo-F429ZI heeft Ethernet aan boord. Ethernet-hardware heeft twee componenten nodig: een PHY (die elektrische signalen verzendt naar en ontvangt van het medium, zoals koper, optische kabel enzovoort) en een MAC (die de PHY-controller aanstuurt). Op ons Nucleo-bord is de MAC-controller ingebouwd en is de PHY extern (de LAN8720a van Microchip).
MAC en PHY kunnen verschillende interfaces gebruiken. Hier gebruiken we RMII. Daarvoor moeten een aantal pinnen worden geconfigureerd om hun alternatieve functie (AF) te kunnen gebruiken. Om een webserver te implementeren hebben we drie softwarecomponenten nodig:

- een netwerkdriver die Ethernet-frames verstuurt/ontvangt naar/van de MAC-controller
- een netwerkstack, die frames ontleedt en TCP/IP begrijpt
- een netwerkbibliotheek die HTTP begrijpt

We zullen gebruik maken van de *Mongoose* netwerkbibliotheek [9] die dat allemaal implementeert in een enkel bestand. Het is een bibliotheek met twee licenties (GPLv2/commercial) die is ontworpen om embedded netwerk-ontwikkeling snel en eenvoudig te maken. Kopieer dus *mongoose.c* [10] en *mongoose.h* [11] naar ons project. Nu hebben we een driver, een netwerkstack en een bibliotheek bij de hand. Mongoose biedt ook een grote verzameling voorbeelden, en één daarvan is een apparaatdashboard [12]. Het implementeert veel zaken, zoals dashboard-login, real-time gegevensuitwisseling via WebSocket, een embedded bestandssysteem, MQTT-communicatie enzovoort. Laten we dat voorbeeld gebruiken. Kopieer twee extra bestanden:

- *net.c* [13] – implementeert dashboardfunctionaliteit
- *packed_fs.c* [14] – bevat HTML/CSS/JS GUI-bestanden

We moeten Mongoose vertellen welke functionaliteit ingeschakeld moet worden. Dat kan via compilatievlaggen, door preprocessor-constanten in te stellen. Als alternatief kunnen dezelfde constanten worden ingesteld in het bestand *mongoose_custom.h*. Laten we dat hier doen. Maak een *mongoose_custom.h*-bestand aan met de volgende inhoud:

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

Listing 2. UART-initialisatie.

[zie *https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/blob/main/steps/step-6-clock/hal.h*]

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

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

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

Listing 3. Ethernet initialiseren, MAC GPIO-pinnen inschakelen.

[zie *https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/blob/main/steps/step-7-webserver/nucleo-f429zi/main.c*]

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

Nu moeten we wat netwerkcode toevoegen aan main.c. We schrijven `#include "mongoose.c"`, initialiseren de Ethernet RMII-pinnen en schakelen Ethernet in de RCC in. Zie **listing 3**.

De Mongoose-driver gebruikt Ethernet-interrupt, dus moeten we *startup.c* bijwerken en *ETH_IRQHandler* toevoegen aan de vectortabel. Laten we de definitie van de vectortabel in *startup.c* reorganiseren op een manier die geen aanpassing vereist om een interrupt handler-functie toe te voegen. Het idee is om een 'weak symbol'-concept te gebruiken.

Een functie kan worden aangemerkt als 'weak' ('zwak') maar werkt desondanks als een normale functie. Het verschil komt wanneer in de broncode elders een functie met dezelfde naam wordt gedefinieerd. Normaal gesproken zorgen twee functies met dezelfde naam ervoor dat een build mislukt. Maar als één functie als 'weak' is gemarkeerd, dan slaagt de build en selecteert de linker de niet-zwakke functie. Dit geeft de mogelijkheid om een 'standaard' functie in een sjabloon op te nemen, met de mogelijkheid om deze functie op te heffen door simpelweg elders in de code een functie met dezelfde naam te maken.

Dit is hoe het in ons geval werkt. We willen een vectortabel vullen met standaard handlers, maar de gebruiker de mogelijkheid geven om elke handler te overschrijven. Daarvoor maken we een `DefaultIRQHandler()`-functie en markeren deze als `weak`. Vervolgens declareren we voor elke IRQ-handler een handlernaam en maken we er een alias van naar `DefaultIRQHandler()`:

Listing 4. Mongoose-bibliotheek initialiseren.

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

Listing 5. Makefile met verwijzingen naar bibliotheken.

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

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

Nu kunnen we elke IRQ-handler in onze code definiëren en deze zal de standaard-handler vervangen. Dit is wat er in ons geval gebeurt: Er is een `ETH_IRQHandler()`-functie gedefinieerd door Mongoose's STM32 driver, die een standaard-handler vervangt.
De volgende stap is het initialiseren van de Mongoose-bibliotheek: maak een event manager aan, stel de netwerkdriver in en start een luisterende HTTP-verbinding. Zie **listing 4**.
Wat nog gedaan moet worden is het toevoegen van een `mg_mgr_poll()`-call in de hoofd-programmalus.
Voeg nu de *mongoose.c*, *net.c*, en *packed_fs.c* bestanden toe aan de Makefile. Herbouw de code en flash het board. Sluit een seriële console aan op de debug-uitgang en merk op dat het board een IP-adres verkrijgt via DHCP. Zie **listing 5**.

Start een browser op dat IP-adres en bewonder het functionerende dashboard, met realtime grafieken via WebSocket, MQTT, authenticatie en andere dingen! Zie de volledige beschrijving voor meer details.
De volledige broncode van het project is te vinden in de map *step-7-webserver* [15].

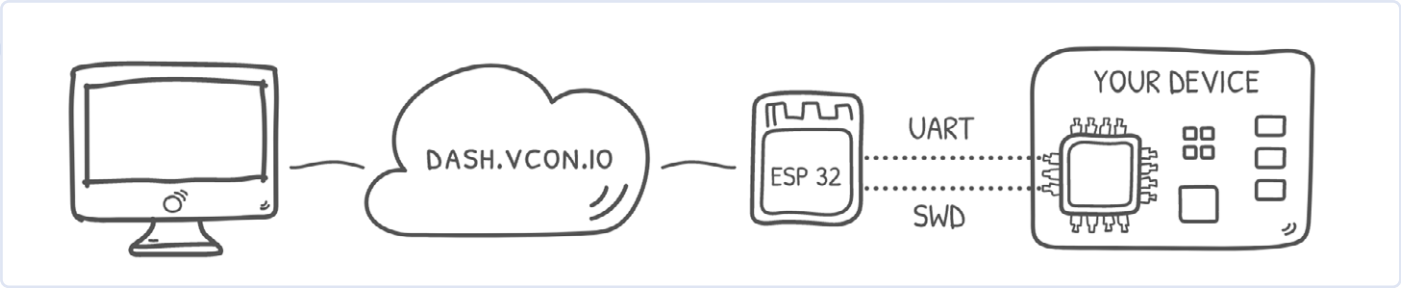
Geautomatiseerde firmware-ontwikkeling (Software CI)

Het is een goede gewoonte voor een software-project om een continue integratie-test (CI) te hebben. Bij elke wijziging die naar de repository wordt gepushed, bouwt CI automatisch alle componenten opnieuw op en test ze.
GitHub maakt dit gemakkelijk. We kunnen een *.github/workflows/test.yml*-bestand aanmaken, wat een CI-configuratiebestand is. In dat bestand kunnen we ARM GCC installeren en `make` uitvoeren in elke voorbeeldmap om de betreffende firmware-bestanden te bouwen.
Om een lang verhaal kort te maken: dit vertelt GitHub om bij elke repo push te draaien:

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

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

Hiermee wordt de ARM GCC-compiler geïnstalleerd:



Figuur 1. ESP32 instellen als op afstand bestuurbare programmer en registreren op vcon.io.

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

Dit bouwt de firmware in elke voorbeeldmap:

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

Dat is alles! Extreem eenvoudig en bijzonder krachtig. Als we nu een verandering naar de repo pushen die een build breekt, zal GitHub ons daarvan op de hoogte stellen. Als alles goed gaat houdt GitHub zijn mond. Bekijk een voorbeeld van een goede run op [16].

Geautomatiseerde firmwaretests (Hardware CI)

Zou het niet geweldig zijn om gebouwde binaire firmware-bestanden ook te testen op echte hardware, om niet alleen het bouwproces te testen, maar ook of de gebouwde firmware correct en functioneel is? Het is niet triviaal om een dergelijk systeem ad hoc te bouwen. Je kunt bijvoorbeeld een speciaal test-werkstation opzetten, daar een getest apparaat aan koppelen (bijvoorbeeld een Nucleo-F429ZI board), een stukje software schrijven voor het op afstand uploaden van firmware en testen met behulp van een ingebouwde debugger. Dat is mogelijk, maar is kwetsbaar en kost veel moeite en aandacht. Het alternatief is om een van de commerciële hardware-testsystemen (embedded board farms, EBF's) te gebruiken, hoewel dergelijke commerciële oplossingen vrij duur zijn. Maar er is een eenvoudigere manier.

De oplossing: ESP32 + vcon.io

Met behulp van de *http://vcon.io* service, die firmware-updates op afstand en een UART-monitor implementeert, kunnen we:

- elk ESP32- of ESP32-C3-apparaat (bijvoorbeeld een goedkoop ontwikkelboard) gebruiken
- daar kant-en-klare firmware op flashen, zodat de ESP32 een op afstand bestuurbare programmer wordt
- de ESP32 op het doelapparaat aansluiten: SWD-pinnen voor flashen, UART-pinnen om de uitvoer vast te leggen
- de ESP32 configureren om zich te registreren op het vcon.io [17] management dashboard

Als dat gebeurd is, heeft je doelapparaat een geauthenticeerde, veilige RESTful API voor reflashing en het vastleggen van de uitvoer van het apparaat. Dit kan van overal aangeroepen worden, bijvoorbeeld vanuit de software-CI (zie **figuur 1**).
Opmerking: de vcon.io service wordt beheerd door Cesanta – het bedrijf waar ik voor werk. Het is een betaalde service met een gratis quotum: als je maar een paar apparaten te beheren hebt, is het helemaal gratis.

ESP32 configureren en bedraden

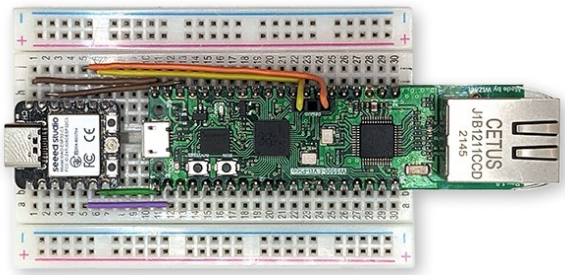
Neem een willekeurig ESP32- of ESP32-C3-apparaat – een devboard, een module of je eigen apparaat. Mijn aanbeveling is het ESP32-C3 XIAO devboard vanwege de lage prijs en kleine vormfactor.
We gaan ervan uit dat het doelapparaat een Raspberry Pi W5500-EVB-Pico-bord [18] is met een ingebouwde Ethernet-interface. Als je een ander apparaat hebt, pas dan de bedrading aan volgens de betreffende aansluitgegevens.

- volg Flashing ESP32 [19] om je ESP32 te flashen.
- volg Netwerk Setup [20] om ESP32 op het dashboard te registreren
- volg Wiring [21] om de ESP32 op uw apparaat aan te sluiten

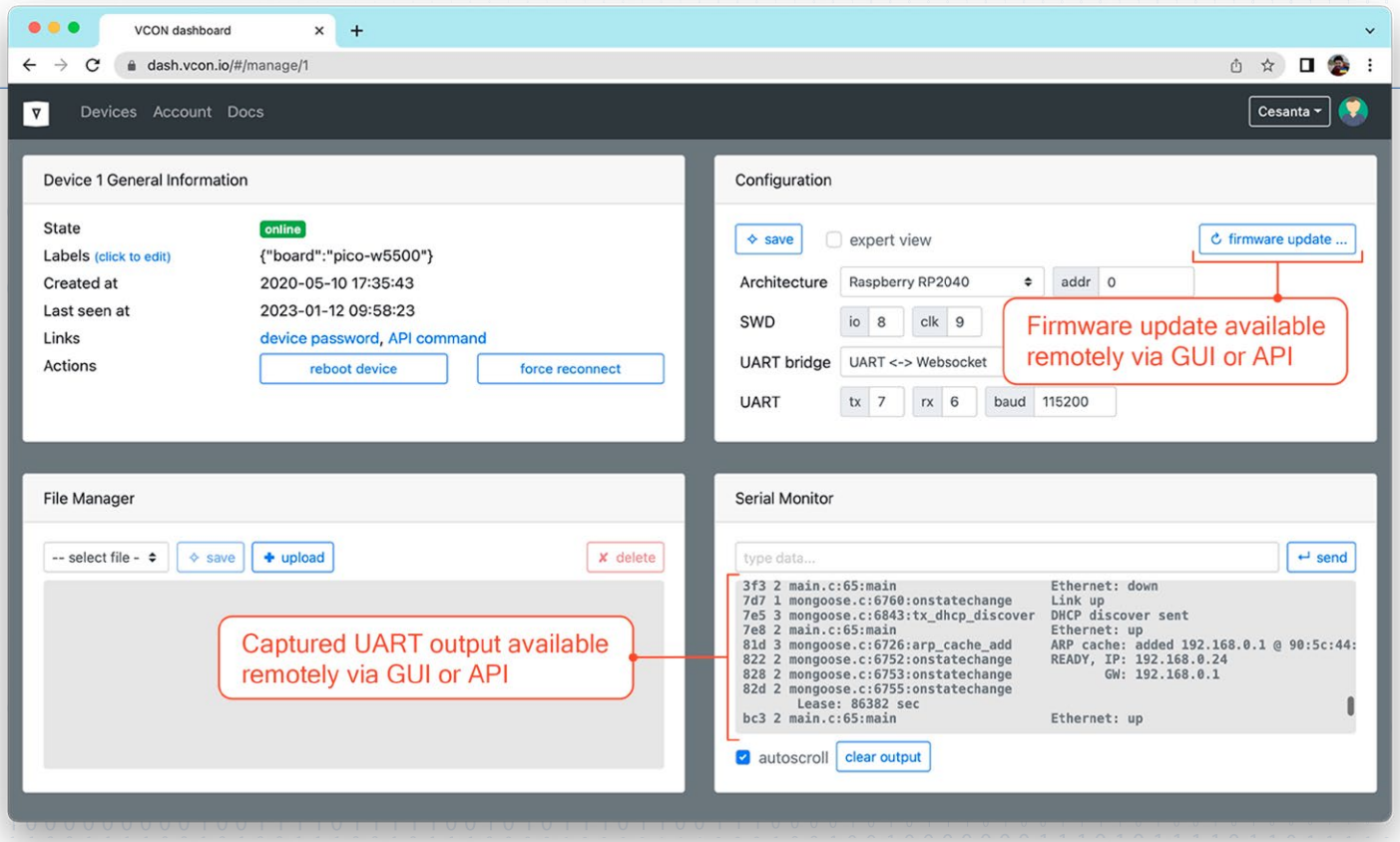
Figuur 2 toont als voorbeeld een opstelling breadboard. **Figuur 3** toont een geconfigureerd apparaat-dashboard.
Nu kun je je apparaat met één commando opnieuw flashen:

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

Waarbij `API_KEY` de dash.vcon.io authenticatiesleutel is, `ID` het geregistreerde apparaatnummer en `firmware.bin` de naam van de nieuw gebouwde firmware. Je kunt de `API_KEY` krijgen door op de *api key*-link van een dashboard te klikken. Het apparaat-ID staat in de tabel.



Figuur 2. Geconfigureerde breadboardopstelling van het apparaat.



Figuur 3. Geconfigureerd apparaat-dashboard.

We kunnen ook de apparaat-uitvoer vastleggen met een enkel commando:

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

Hier betekent `t=5` 5 seconden wachten tijdens het vastleggen van de UART-uitvoer.
Nu kunnen we deze twee commando's gebruiken in elk software CI-platform om nieuwe firmware te testen op een echt apparaat en de UART-uitvoer van het apparaat te vergelijken met enkele verwachte sleutelwoorden.

Integreren met GitHub-acties

Oké, onze software-CI bouwt een firmware-image voor ons, en nu kunnen we dat firmware-image zelfs testen op echte hardware! We moeten een paar extra commando's toevoegen die het hulpprogramma `curl` gebruiken om de gebouwde firmware naar het testboard te sturen en dan de debug-uitvoer vast te leggen.
Het `curl`-commando vereist een geheime API-sleutel, die we niet openbaar willen maken. Over het algemeen is dit de juiste manier:

- Ga naar de projectinstellingen van je project op GitHub (je zou de repository met de webserver-voorbeelden kunnen klonen), dan naar / *Secrets* / *Actions*
- Klik op de knop *New repository secret*
- Geef het een naam, `VCON_API_KEY`, plak deze in een *Secret*-box en klik op *Add secret*

Een van de voorbeeldprojecten [22] bouwt firmware voor het RP2040-W5500 board, dus laten we het flashen met behulp van een `curl`-commando en een opgeslagen API-sleutel. De beste manier is om een Makefile-target toe te voegen om te testen, en GitHub Actions (onze software-CI) het te laten aanroepen:

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

[zie https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/blob/main/.github/workflows/test.yml]

Merk op dat we een `VCON_API_KEY`-omgevingsvariabele doorgeven aan make. Merk ook op dat we het `test` Makefile-target aanroepen, dat onze firmware moet bouwen en testen. In **listing 6** zie je de `test` Makefile-target.
Uitleg:

- regel 34: het `test`-target is afhankelijk van het `upload`-target, dus `upload` wordt eerst uitgevoerd (zie regel 38)
- regel 35: UART-log 5 seconden vastleggen en opslaan in */tmp/output.txt*
- regel 36: zoek naar de string `Ethernet: up` in de uitvoer en fail als deze niet wordt gevonden
- regel 38: het `upload`-target is afhankelijk van `build`, dus we bouwen altijd firmware voordat we testen
- regel 39: we flashen firmware op afstand. De `--fail` vlag voor het hulpprogramma `curl` zorgt ervoor dat het mislukt als het antwoord van de server niet succesvol is (geen HTTP 200 OK).

In **listing 7** vind je de voorbeeldduitvoer van het hierboven beschreven `make test` commando.
Klaar! Nu zorgen onze automatische tests ervoor dat de firmware gebouwd kan worden, dat het bootable is, dat het de netwerk stack correct initialiseert. Dit mechanisme kan eenvoudig worden uitgebreid: voeg gewoon complexere acties toe in je binaire firmware, print het resultaat naar de UART en controleer op de verwachte uitvoer in de test.
Test ze!

220665-C-03

Listing 6. Makefile voor webserver op de Pico.

[zie *https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/blob/main/steps/step-7-webserver/pico-w5500/Makefile*]

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

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

Listing 7. Uitvoer van het commando Make Test.

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

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via sergey.lyubka@cesanta.com of naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.

Over de auteur

Sergey Lyubka is ingenieur en ondernemer. Hij heeft een MSc in natuurkunde van de staatsuniversiteit van Kiev, Oekraïne. Sergey is directeur en medeoprichter van Cesanta, een technologiebedrijf gevestigd in Dublin, Ierland (Embedded Web Server voor elektronische apparaten: https://mongoose.ws). Zijn passie is puristische embedded netwerkprogrammering.

Gerelateerde producten

- **Dogan Ibrahim, Nucleo Boards Programming with the STM32CubeIDE (Elektor 2020)**
  www.elektor.nl/19530
- **Dogan Ibrahim, Programming with STM32 Nucleo Boards (Elektor 2015)**
  www.elektor.nl/18585

WEBLINKS

[1] Deze handleiding op GitHub: https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide
[2] Sergej Lyubka, "Een gids voor puristisch programmeren (deel 1)", Elektor juli/augustus 2023: http://www.elektormagazine.nl/220665-03
[3] Sergey Lyubka, "Een gids voor puristisch programmeren (deel 2)", Elektor september/oktober 2023: http://www.elektormagazine.nl/220665-B-03
[4] CMSIS versie 5: https://github.com/ARM-software/CMSIS_5
[5] STM32 CMSIS-headers voor F4-reeks: https://github.com/STMicroelectronics/cmsis_device_f4
[6] Step 5 CMSIS-map: https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/tree/main/steps/step-5-cmsis
[7] Referentiehandleiding RM0090 voor STM32F4xx-controllers [PDF]: https://tinyurl.com/stm32f4man
[8] Step 6 Clock map: https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/tree/main/steps/step-6-clock
[9] Mongoose netwerkbibliotheek: https://github.com/cesanta/mongoose
[10] mongoose.c: https://raw.githubusercontent.com/cesanta/mongoose/master/mongoose.c
[11] mongoose.h: https://raw.githubusercontent.com/cesanta/mongoose/master/mongoose.h
[12] Reeks voorbeelden van Mongoose: https://github.com/cesanta/mongoose/tree/master/examples/device-dashboard
[13] Webserver-voorbeeld, net.c: https://raw.githubusercontent.com/cesanta/mongoose/master/examples/device-dashboard/net.c
[14] Webserver-voorbeeld, packed_fs.c: https://tinyurl.com/packedfsc
[15] Step 7 Webserver map: https://github.com/cpq/bare-metal-programming-guide/tree/main/steps/step-7-webserver
[16] Voorbeeld: succesvolle CI-run: https://tinyurl.com/bmgoodrun
[17] vcon.io: https://dash.vcon.io/
[18] Raspberry Pi W5500-EVB-Pico board: https://docs.wiznet.io/Product/iEthernet/W5500/w5500-evb-pico
[19] ESP32 flashen: https://vcon.io/docs/#module-flashing
[20] Netwerk-setup: https://vcon.io/docs/#module-registration
[21] Bedrading: https://vcon.io/docs/#module-to-device-wiring
[22] Webserver-voorbeeld voor Pico: https://tinyurl.com/picowebeg

Elektor Webinars

DEC 14 2023 16:00 CET

Exploring the ESP32 P4 Module and the Guest-Edited Elektor Mag

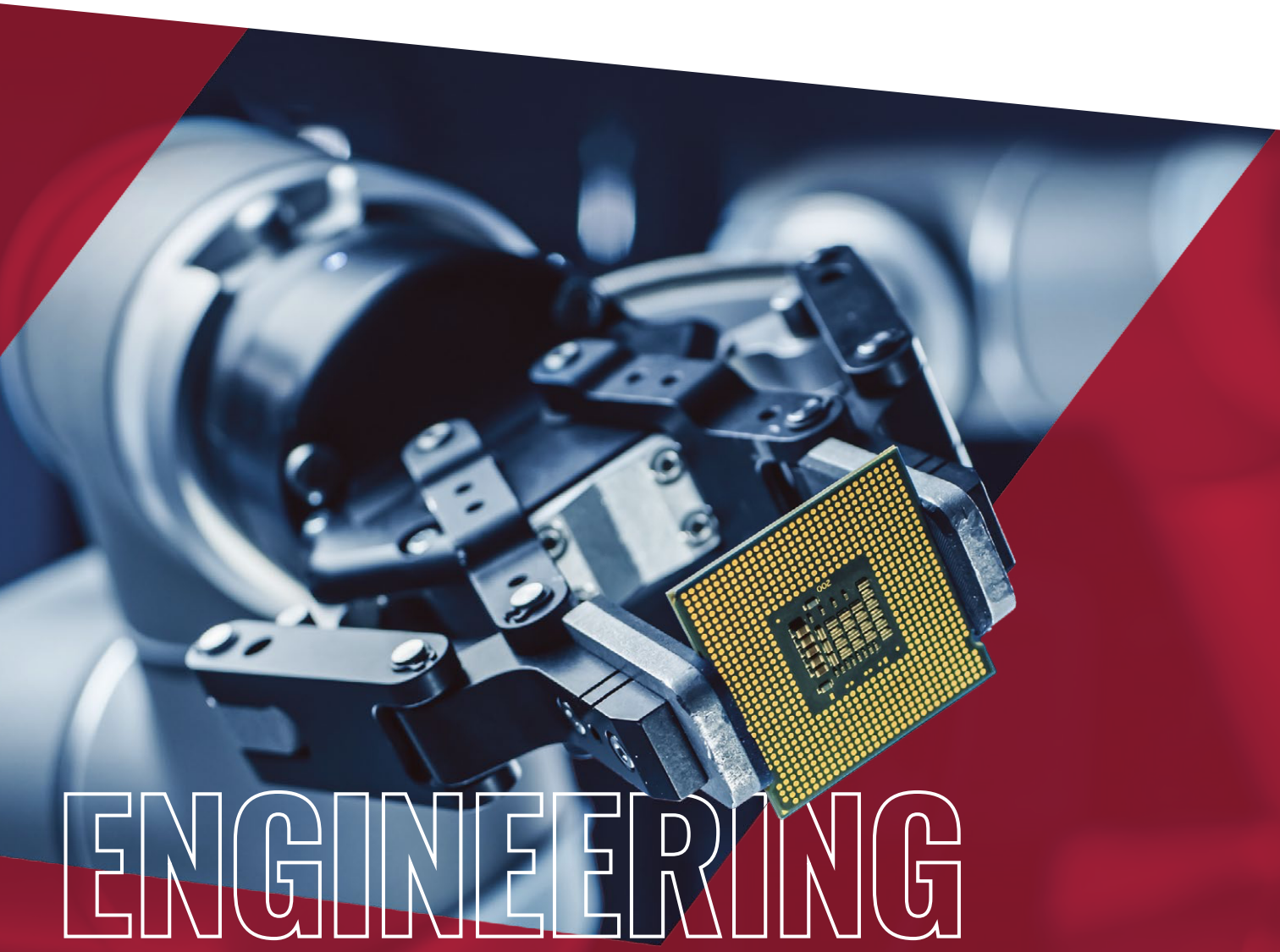
Onder leiding van Anant Raj Gupta en Brian Tristam Williams

Ontdek hoe de ESP32 P4 AI-toepassingen en slimme apparaten ondersteunt en hoor meer over de Espressif gasteditie van Elektor Magazine.

Maak kans op een ESP32-C3-DevKitM-1 board!

www.elektormagazine.nl/esp32w2

ESPRESSIF × elektor



ENGINEERING A BETTER WORLD

IMAGINE THAT. WE CAN.

Let us take you on a journey of discovery. Whether you design, build or maintain, we have ingenious technologies and solutions to help engineer a better world for everyone.

een Zwitsers zakmes

deel 2: de hard- en software

Gilles Brocard (Frankrijk)

Nadat we in het eerste deel het LoRa-protocol hebben behandeld, gaan we nu in op de details van de bouw van een LoRa-zender/ontvanger met behulp van een kleine kant-en-klare module. Aangestuurd door een Arduino Nano en een programma dat volledig gewijd is aan LoRa-configuratie en zenden/ontvangen, is het resultaat een echt Zwitsers LoRa-zakmes.

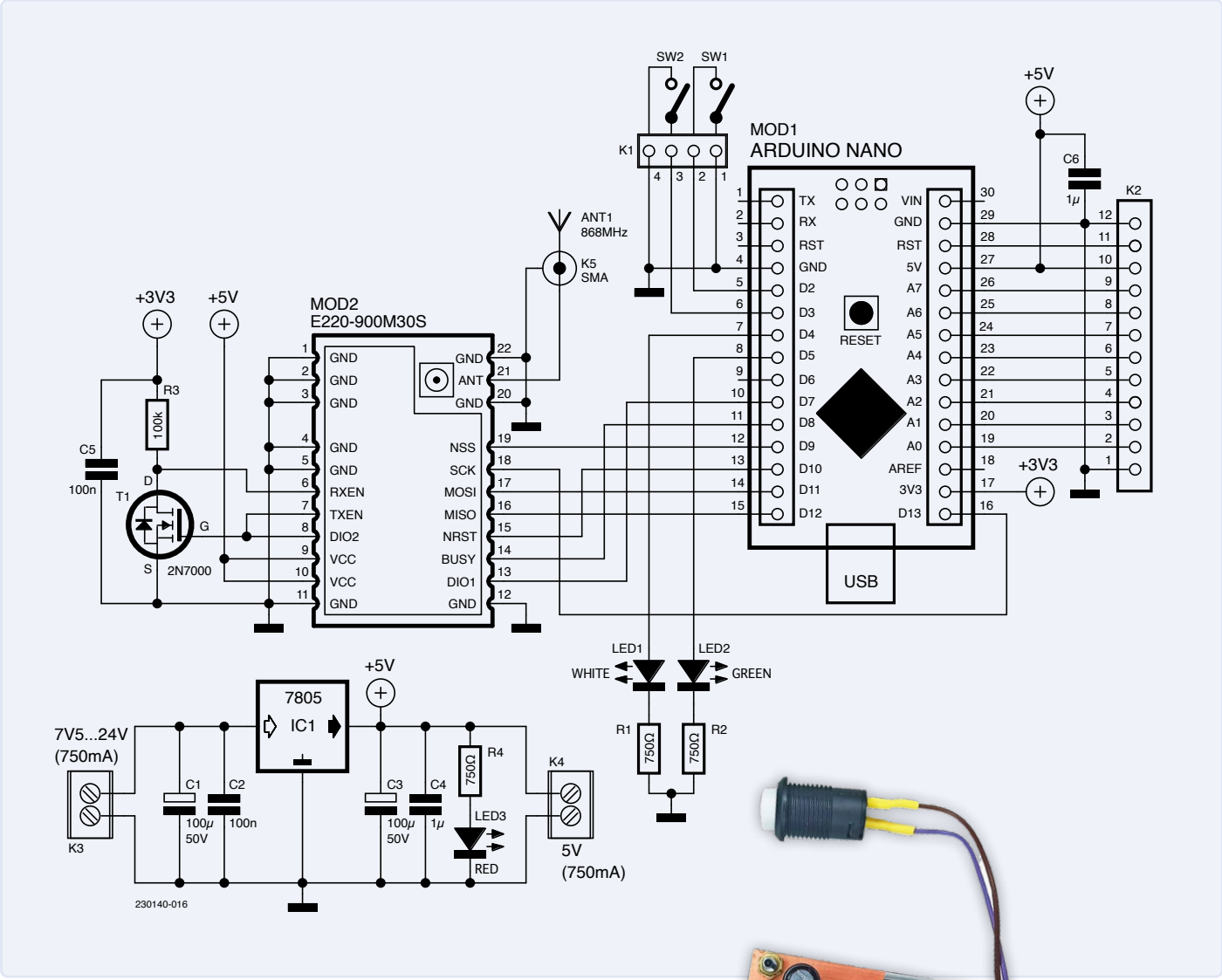
De kleine print die we hier beschrijven, bestaat uit een LoRa-module, een Arduino Nano-board, een 5V-regelaar, enkele LED's en printkroonstenen om sensoren (elk type), regelaars en een OLED I²C-display of extra LED's eenvoudig aan te sluiten. Het geheel is erg flexibel, mede dankzij de software. Het is een echt Zwitsers LoRa-zakmes.
In het kort betreft het schema (**figuur 1**) vooral de verbindingen tussen de Arduino Nano en de E220-900M30S-module, met een spanningsregelaar en een LED die de aanwezigheid van +5 V bevestigt, en twee andere LED's als zend- (Tx) en ontvangstindicatie (Rx).
Andere componenten kunnen worden aangesloten via connector K2. Poorten A0 tot A5 zijn analoge ingangen of digitale I/O, afhankelijk van de configuratie. Daarnaast kunnen A4 en A5 worden geconfigureerd als I²C-bus om I²C-sensoren of zelfs een klein OLED-scherm van 128×64 pixels aan te sluiten. A6 en A7 zijn twee speciale analoge ingangen. De analoge ingangen van de Nano hebben een resolutie van 10 bit. De +5V-aansluiting kan zowel als ingang of als uitgang functioneren.
De DIO2-poort van de LoRa-module is verbonden met de Tx-ingang van de antenneschakelaar en met de gate van T1, die dienst doet als logische inverter. De drain stuurt de Rx-ingang van dezelfde antenneschakelaar aan.
LED1 (wit) is de zend-indicator (Tx). LED2 (groen) signaleert de ontvangst (Rx) van een geldig LoRa-signaal, echter zonder informatie over de inhoud. Bovendien activeert het programma poort A2 gedurende één seconde als het verwachte bericht wordt gedetecteerd. Dit maakt het heel eenvoudig om de assemblage te gebruiken als afstandsbediening met groot bereik.

Voeding

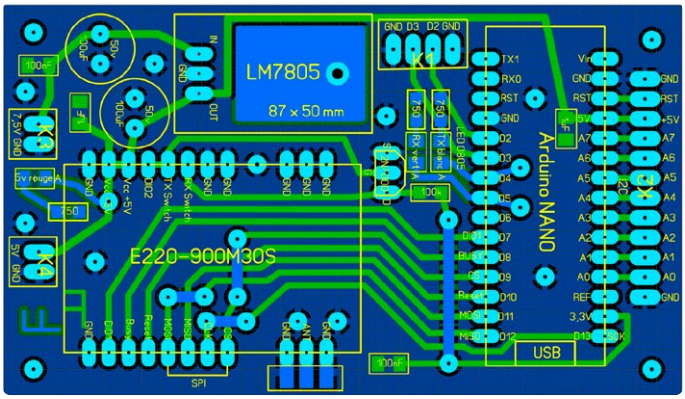
De ingangsspanning op K3 mag niet hoger zijn dan 24 V. Het is ook mogelijk om de print rechtstreeks met 5 V te voeden via K4. In beide gevallen moet de voeding maximaal 750 mA kunnen leveren.
Een koellichaam voor IC1 is optioneel, omdat in LoRa-modus de zend/slaap duty-cycle erg laag is (maximaal 1%) en de gemiddelde dissipatie erg laag blijft. In werkelijkheid kun je tot 35 V op de ingang zetten. Zelfs met 750 mA voor een uitgangssignaal van 30 dB is de dissipatie slechts ongeveer 0,25 W (ervan uitgaande dat de schakeling de rest van de tijd 'slaapt').

De print

De print (**figuur 2**) meet 87×50 mm en kan in de meeste soorten behuizingen worden gemonteerd (optioneel). De antenne-uitgang is gemaakt met een SMA-connector, perfect geschikt voor bijna-gigahertz-frequenties (dat is niet het geval met BNC).
De bedrading is eenvoudig. De LED's, weerstanden en condensatoren van 100 nF en 1 µF zijn allemaal SMD 1206-types – gemakkelijk te solderen. De andere componenten zijn through-hole. Als je print geen doorgemetalliseerde gaten heeft (**figuur 3**), vergeet dan niet de straps, de verbindingen met het massavlak en die voor de aansluitingen van D4 en D5 tussen de beide zijden van de print.
Als je over lange afstanden wilt communiceren (10 km of meer), is het raadzaam om de schakeling in een waterdichte behuizing te monteren, direct onder de antenne die hoog gemonteerd moet worden (2 m boven de grond is optimaal) om HF-kabelverliezen te minimaliseren. Een andere oplossing is om de Arduino Nano te vervangen door een ESP32. In dit geval worden de berichten doorgestuurd via WiFi voordat ze worden verzonden via LoRa. De wijzigingen aan de sketch zijn gering; er is een aangepaste versie beschikbaar.
Een Tx/Rx-schakelaar kan worden aangesloten tussen de punten D2 en massa van connector K3. Hierdoor kan de bedieningsmodus op elk moment worden gewijzigd tussen zenden (open) en ontvangen (gesloten). Als de schakeling alleen in Rx-modus wordt gebruikt, moet je de contacten 1 en 2 van K1 overbruggen. Als je de schakeling in Tx-modus wilt houden, laat je de contacten open.



Figuur 1. Schema van ons Zwitsers LoRa-zakmes.



Figuur 2. De print-layout en broncodebestanden zijn beschikbaar op de projectpagina bij dit artikel [1].

Figuur 3. Het zelfgebouwde prototype van de schakeling op een dubbelzijdige, niet doorgemetalliseerde print, wat verklaart waarom sommige onderdelen (ook) aan de bovenzijde zijn gesoldeerd.

Het programma

Met de sketch [1] kun je de LoRa-configuratie eenvoudig aanpassen voor allerlei experimenten en pogingen tot LoRa-transmissie over lange afstanden. Hier kun je een record breken!

De software maakt ook hot-switchen tussen zenden (Tx) en ontvangen (Rx) mogelijk. Ook kunnen talloze analoge of digitale (I²C-)sensoren worden aangesloten. Zie het kader **Overzicht van het LLCC68-besturingsprogramma** om te zien hoe de sketch is opgebouwd.

LoRa-optimalisatie

De LLCC68 kan de zender informeren over de ontvangstkwaliteit van het signaal zodat deze de transmissieparameters (vermogen, SF, CR enzovoort) kan aanpassen. Dit is een van de methoden die door de LoRaWAN-laag worden gebruikt.

- De RSSI (received signal strength indicator) is het ontvangen signaalvermogen, die de ontvanger kan terugsturen naar de zender. Deze waarde kan worden gebruikt om de transmissieparameters aan te passen, door het zendvermogen te verhogen of te verlagen om de autonomie te maximaliseren met behoud van een voldoende zendniveau.
- De LLCC68 kan het minimale ontvangstniveau meten waarmee een signaal zonder fouten kan worden opgehaald. Deze waarde is zeer laag in het geval van de LLCC68; hij kan zo laag zijn als –129 dBm als functie van de gekozen parameters.
- De SNR (signaal/ruis-verhouding) is de verhouding tussen het vermogen van het ontvangen signaal en het omgevingsruisniveau dat de LLCC68 meet wanneer geen data worden ontvangen. In het geval van LoRa kan het ruisniveau aanzienlijk groter zijn dan het signaalniveau (negatieve SNR).
- De GetStats-instructie retourneert het totale aantal ontvangen packets, het aantal ontvangen packets met fouten en het aantal ontvangen packets met headerfouten. De ResetStats-instructie reset alle statistieken.

Het lezen van de 106 pagina's tellende datasheet is niet per se nodig, maar is zeer nuttig om meer diepgaande informatie te verkrijgen over enkele van de onderwerpen die in dit artikel worden genoemd. We raden je ook aan om het opmerkelijke document te lezen dat is geschreven door de leraren van het Lycée Dorian [3] [opmerking: dit is in het Frans]. Het behandelt de fysieke LoRa-laag, maar ook die van LoRaWAN en LoRa-demodulatie, waarover Semtech geen informatie geeft.

De belangrijkste LoRa-configuratieparameters

Alle LoRa-configuratieparameters staan tussen regel 83 en regel 111:

Regel 83: omschakelaar voor LoRa-bediening.
Regel 84: configuratie van FS, BW, CR en LDRO.
Regel 99: de parameters van het verzendpakket worden geconfigureerd in negen bytes; de laatste drie zijn gebruikelijk bij FSK-modulatie.

Voor elk van deze drie programmaregels is de eerste byte geen configuratiebyte, maar de opcode (het commando) die de LLCC68 vertelt wat hij met de volgende bytes moet doen. Er zijn in totaal 41 opcodes. Zie de datasheet voor meer details. Daar vind je ook de adressen van de 36 configuratieregisters.

SF – de spreidingsfactor

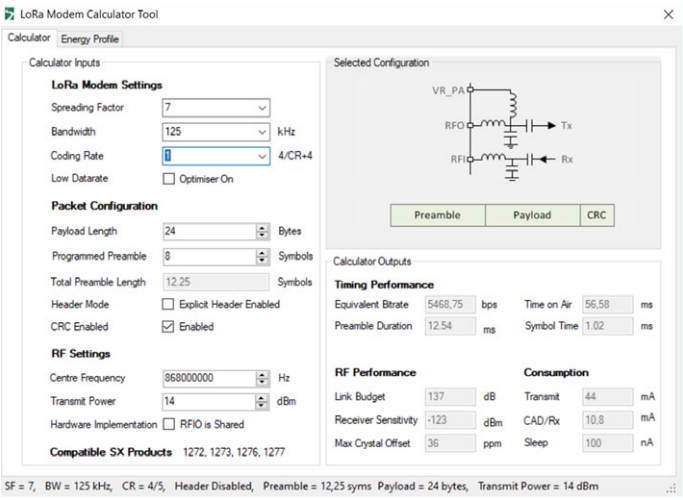
De gevoeligheid van het analoge ontvangstpad kan alleen worden aangepast via de versterking van de ingangsvoorversterker, die configureerbaar is (zie regel 154 van de sketch). Maar we hebben gezien dat hoe meer we de waarde van SF verhogen, des te meer de datasnelheid afneemt. Omdat de efficiëntie van de digitale reconstructie van het bericht omgekeerd evenredig is met de datasnelheid, neemt de digitale gevoeligheid toe met de waarde van SF (net als de zendtijd). Dit verhoogt de gevoeligheid van het analoge deel, waardoor hogere gevoeligheidscijfers en dus een groter bereik mogelijk worden.
SF komt ook overeen met het aantal bits dat wordt verzonden tijdens de periode T_S, dat wil zeggen per symbool.
De transmissietijd van een symbool T_S en van een bericht van 24 bytes is te zien in **tabel 1**. Semtech heeft een calculator op zijn website [2] geplaatst (**figuur 4**) die een nauwkeurige evaluatie van de zendtijd, het stroomverbruik en het linkbudget mogelijk maakt. Aarzel niet om deze te gebruiken, want hoewel hij niet specifiek gemaakt is voor de LLCC68 (veeleer voor de SX1272...SX1277), zijn de resultaten bijna identiek. Het verhogen van de waarde van SF naar de volgende waarde verdubbelt bijna de zendtijd, zoals blijkt uit tabel 1.
De waarde van de gegevenssnelheid (de bitsnelheid) is R_B en wordt berekend met de formule

$$R_B = SF \cdot (BW/2^{SF}) \cdot 4/(4+CR) \text{ (bits/s)} \quad (1)$$

Omdat SF gelijk is aan het aantal bits per symbool, kan de baudsnelheid R_S (symbol rate) worden berekend:

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

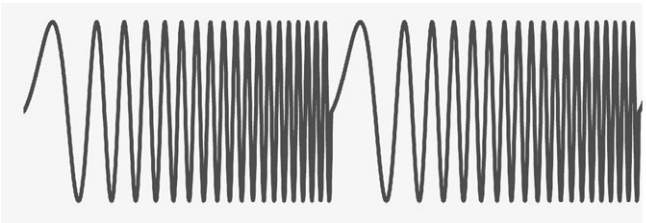
Aangezien de drie waarden BW, SF en CR bekend zijn, kunnen we eenvoudig de gewenste transmissiesnelheid configureren.



Figuur 4. Er is ook een online versie van de LoRa modem-calculator van Semtech.

CR – de Code Rate

Met LoRa kan de betrouwbaarheid van de transmissie worden verhoogd door de redundantie van het signaal te verhogen. Voor CR = 1 is de redundantie 4/5, wat betekent dat er vijf bits worden gebruikt om elke vier databits te coderen. Voor CR = 4 is de verhouding 4/8, waarbij acht bits worden gebruikt om vier databits te coderen. Aangezien elk voordeel een nadeel met zich meebrengt, gaat een verhoging van de



Figuur 5. Twee chirps (modulatie is ter illustratie overdreven).

Tabel 1.
Transmissietijden als functie van spreidingsfactor SF.

SF	Rb (bit/s)	Rs (baud)	Preamble tijd (ms)	Ts (ms)	Transmissie-tijd (ms)
5	15.625	3.125	3,135	0,256	16,37
6	9.375	1.562,5	6,27	0,51	30,85
7	5.468,75	781,3	12,54	1,02	56,58
8	3.125	390,6	25,09	2,05	102,91
9	1.757,8	195,3	50,18	4,10	185,34
10	976,5	97,7	100,35	8,19	370,69
11	537,11	48,8	200,70	16,38	659,46

Deze waarden zijn zonder header. De aanwezigheid van een header zal de transmissieduur verlengen. Hier is CR = 1, BW = 125 kHz, een bericht (payload) bevat 24 bytes en een preamble bestaat uit 8 + 4,25 = 12,25 symbolen. T_S = 2SF/BW.

De spreidingsfactor SF komt ook overeen met het aantal verzonden bits gedurende de tijd T_S. De waarden R_B en R_S in de tabel zijn verkregen met de Semtech-datacalculator die compatibel is met de producten SX1272...1277. Hoewel het niet specifiek wordt vermeld, is die calculator ook compatibel met de LLCC68. Opmerking: de transmissievertraging R_B van een bit van de payload (gebruikersbericht) en van een bit van de preamble zijn niet identiek.

CR gepaard met een verlaging van de R_B (zie vergelijking 1) waardoor de overdrachtstijd van het bericht groter wordt.

BW – de bandbreedte

De bandbreedte wordt ook wel de spectrale 'verstopping' van het gemoduleerde signaal genoemd. De variatie van een *chirp* (**figuur 5**), die zich uitstrekt van F – df tot F + df, bepaalt de in beslag genomen bandbreedte. Omdat R_B evenredig is met BW, volgens vergelijking 1, kan de transmissietijd van een bericht worden verkort door een grotere waarde voor BW te kiezen. In tegenstelling tot de andere parameters is er geen praktisch nadeel aan een dergelijke verhoging, afgezien van een groter gebruik van de frequentieband.

Optimalisatie van de gegevens voor lage gegevenssnelheden

Rekening houdend met de potentieel lange packettijd voor hoge waarden van SF (10 of 11), moet de optie LDRO (Low Data Rate Optimization) worden geactiveerd. Deze optie verhoogt de betrouwbaarheid van de verzending ten opzichte van eventuele frequentievariaties tijdens het verzenden en ontvangen van het packet. Het gebruik ervan is vereist als de duur van een symbool, T_S, groter is dan 16 ms. In tabel 1 is bijvoorbeeld te zien dat, als SF = 11, LDRO moet worden gebruikt omdat T_S > 16 ms. De zender en de ontvanger moeten dezelfde LDRO-waarde gebruiken.

Overzicht van het LLCC68-besturingsprogramma

De 48 KB grotee sketch bestaat uit 571 regels, waarvan het grootste deel van gedetailleerd commentaar is voorzien (in het Frans). Het commentaar verwijst naar de paginanummers van de LLCC68-datasheet. Het programma is eenvoudig opgebouwd zodat het kan worden aangepast aan elk soort toepassing.

Regel 1: Het programma bevat de SPI.h-bibliotheek. Deze maakt deel uit van de ingebouwde Arduino -bibliotheken. Deze hoeft niet geïnstalleerd te worden.

Regels 5 tot 15: Twee tabellen, één om het te verzenden bericht (TX) op te slaan, de andere om het ontvangen bericht (RX) op te slaan.

Regels 17 tot 28: Overzicht van de initialisatie van de ingangen en uitgangen om aanpassing aan elk type toepassing mogelijk te maken.

Regels 31 tot 48: Declaratie van de nodige variabelen voor de interne berekeningen van de sketch en de adressen van de registers van de LLCC68 die door het programma worden gebruikt.

Regels 50 tot 56: Declaratie van de algemene configuratievariabelen van de LLCC68.

Regels 57 tot 81: Declaratie van de variabelen die specifiek zijn voor de FSK-modulatie (de laatste drie packet-parameters zijn gemeenschappelijk voor LoRa).

Regels 83 tot 111: Declaratie van de LoRa-modulatievariabelen.

Regels 113 tot 170: Declaratie van de configuratievariabelen voor alle RF-functies van de LLCC68.

Regel 172: De vereiste Arduino `setup()`-functie.

Regel 197: De andere vereiste Arduino-functie, `loop()`. Deze bestaat uit twee delen. De RX/TX-modusschakelaar bepaalt welk deel wordt uitgevoerd.

Regels 232 tot 277: Vijf functies voor correctie van bepaalde beperkingen van de LLCC68 (zie hoofdstuk 15 van de datasheet).

Regels 278 tot 311: De functies `Message()`, `busy()` en `RX_Wait()`, gebruikt in de RX-modus. In de `RX_Wait()`-functie wacht een oneindige lus op de ontvangst van een geldig LoRa-bericht. De modusschakelaar maakt het mogelijk de lus te verlaten en over te schakelen van RX- naar TX-modus.

Regels 313 tot 355: `TXRX_Setup()`, de functie die gemeenschappelijk is voor zowel RX als TX, vervolgens `TX_Setup()` voor de configuratie van de TX-modus en `RX_Setup()` voor de RX-modus.

Regel 356: de functie `TX_Send()`, die de TX-modus en de verzending van een bericht start.

Regel 371: De `RX_Read()`-functie, die de RX-modus start en het programma in een oneindige lus plaatst, wachtend op een geldig LoRa-bericht.

Regel 411: `Fsk_Setup()` configureert de FSK-modus.

Regel 433: `Lora_Setup()` configureert de LoRa-modus.

Regels 454 tot 483: Groepeert de SPI-functies en vervolgens de functie `Status()` voor toegang tot de status van de LLCC68.

Regels 484 tot 571: Groepen `Affichage_GetRssi()`, `Affichage_GetRssiInst()` en `Affichage_GetStats()` – functies voor het meten van respectievelijk RSSI, SNR, en het ophalen van statistieken, zoals transmissiefouten en aantal berichten. Ze kunnen opnieuw worden verzonden om de link te optimaliseren.

Overdrachtssnelheid

De overdrachtssnelheid en het bereik van LoRa-berichten zijn afhankelijk van de waarden van SF, CR, BW en LDRO, maar ook van de keuze voor een header (expliciete optie) of niet (standaardoptie) en de lengte van die header, indien daarvoor is gekozen.

Terug naar de E220-900T modules

Met de software om de E220-900T22- of -30-modules aan te sturen die in het eerste deel [5] is gepresenteerd, kun je de LoRa-parameters niet configureren zoals je nu kunt doen. Ze stellen automatisch de parameters in die het beste zijn om de gewenste transmissiesnelheid te krijgen. Dit is erg jammer, want elke configuratie heeft zijn eigen voor- en nadelen. Daarom hebben we gekozen voor de E220-900M30S-module, die via zijn SPI-interface totale configuratie-flexibiliteit biedt.

Gebruik van de software

Alle commando's en configuraties, behalve die welke specifiek zijn voor je sensor, worden verzameld aan het begin van de sketch en zijn rijkelijk voorzien van commentaar. Tijdens de uitvoering van de sketch kun je bovendien de werking ervan stap voor stap volgen in de seriële monitor op je PC, omdat de sketch ruimschoots voorzien is van `serial.print()`-opdrachten. Zie ook het kader **Overzicht van het LLCC68-besturingsprogramma** voor meer details.

Een bericht verzenden (Tx)

Er is een schrijfbuffer op regel 6 die je bericht moet bevatten telkens wanneer je de sketch start. Vervang hiervoor de ASCII-codes in regel 7 en 8 door je bericht (maximaal 127 bytes, in ASCII). Als je bericht een numerieke waarde is (bijvoorbeeld de output van de sensormeting), moet je die converteren naar ASCII voordat je de waarde naar de tabel schrijft.

Houd je aan het formaat van de tabel. Verander de eerste twee bytes niet – 0x0E is het commando (opcode) dat de LLCC68 nodig heeft om naar de buffer te schrijven; 0x80 is het adres van de TX-sectie van de buffer. Je moet echter de derde byte instellen, die het totale aantal bytes van je bericht is. Deze wordt gebruikt vanaf het herstel van het bericht tot het moment van ontvangst. Opmerking: alle waarden zijn hexadecimaal.

Afhankelijk van de lengte van je bericht moet je misschien nog een paar parameters aanpassen: de maximale lengte van het bericht (regel 99, bytes 4 en 7), en ook regel 125 en 126 voor ontvangst. Op regel 122 kun je de locatie van de ontvangst- en zendbuffers wijzigen; de parameters die specifiek zijn voor LoRa staan in de regels 83 tot 112.

Zet schakelaar SW_1 in positie Tx (open) en start de sketch opnieuw. Je bericht wordt dan periodiek verzonden, gescheiden door een programmeerbare vertraging (regel 229). Je zult waarschijnlijk de verhouding van de busy- en sleep-tijd moeten aanpassen zodat deze niet boven 1% komt (wettelijke limiet voor LoRa-transmissies in Frankrijk).

Een bericht ontvangen (Rx)

Zet schakelaar SW_1 in de Rx-stand (gesloten) en start het programma opnieuw. Het zal dan wachten op de ontvangst van een geldig LoRa-bericht, dat automatisch in de ontvangstbuffer wordt geplaatst (regel 14). Je hoeft het dan alleen nog maar te lezen.

Een andere manier om dit te doen is door de Rx-functie aan te passen, regel 37, die het mogelijk maakt om een ontvangen bericht terug te halen in de lus, regels 381 tot 396. Hij gebruikt een `if`-constructie voor het herkennen van de byte 0x0A, waardoor de `Message_Valide`-vlag op 1 wordt gezet. Het voorbeeld doet een LED op het board oplichten, maar het kan ook worden gebruikt voor remote signaleringsdoeleinden.

Enkele toepassingsideeën

Een GPS-baken voor mens, dier of wat dan ook is een toepassingsvoorbeeld van ons Zwitsers LoRa-zakmes. Het programma dat we hebben ontwikkeld is in elk geval zeer veelzijdig en suggereert een groot aantal andere toepassingen, zoals:

- verzamelen van gegevens (bodemvochtigheid, zonlichtniveau enzovoort) voor een landbouwtoepassing of een weerstation;
- een domoticasysteem voor een tuin, een park, meerdere huizen, een hele straat of zelfs een dorp;
- bewaking (brand, beveiliging) of telemetrie van een groot of geïsoleerd gebied (zwembad, sportterrein, industriële installatie enzovoort).
- centrale distributie van de tijd, maanstanden en de stand van de belangrijkste planeten naar ontvangende klokken in een huis of groter gebouw (museum, gemeentehuis enzovoort) of in een stadsdeel.

Er zijn er nog veel meer, en waarschijnlijk zijn er al talloze andere mogelijkheden in je opgekomen...

230140-B-03

De Europese norm

Je mag conform het LoRa-protocol in de 868MHz-band zenden, met inachtneming van de Europese regels, die samengevat als volgt luiden:

1. Zend niet uit buiten de 868 MHz-band.
2. Gebruik geen grotere bandbreedte dan BW = 500 kHz.
3. Het uitgestraalde vermogen in lucht mag niet hoger zijn dan 14 dBm (25 mW). Dit kan veel meer zijn aan de uitgang van de module, afhankelijk van de verliezen tussen de module en de antenne.
4. Zend niet meer dan 1% van de tijd (duty cycle). Dat wil zeggen dat als de transmissietijd van een bericht 0,1 seconde is, we slechts elke 0,1 × 100 = 10 seconden een nieuwe transmissie mogen doen, oftewel zes keer per minuut (wat voldoende is voor veel toepassingen).

Een voorbeeld: als je net de auteur een beagle als metgezel hebt die vaak wegloopt, en je wilt zijn GPS-coördinaten weten zodat je hem kunt terugvinden op zijn zwerftochten, dan zal een halsband met een GPS-ontvanger, een LoRa-zender en een kleine batterij je problemen oplossen. Zes keer per minuut verzendt het de positie van de hond tot op een afstand van 10 km (zonder obstakels). De gadget verbruikt heel weinig stroom: het is een licht, klein systeem met een grote autonomie.

Over de auteur

Gilles Brocard is gepensioneerd raadgevend ingenieur en trainer voor analoge elektronische simulatiesoftware (LTspice). Hij is ook een specialist in het ontwerpen van on-board converters (SMPS).

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via brocard.gilles.b26@gmail.com of naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.

Gerelateerde producten

- **Great Scott Gadgets HackRF One Software Defined Radio (1 MHz to 6 GHz) (SKU 18306)**
  www.elektor.nl/18306
- **CircuitMess Chatter – DIY LoRa Communicator (SKU 20407)**
  www.elektor.nl/20407
- **Claus Kühnel, Develop and Operate Your LoRaWAN IoT Nodes, Elektor 2023 (SKU 20147)**
  www.elektor.nl/20147

WEBLINKS

[1] Broncode en print-layout: http://www.elektormagazine.nl/230140-B-03
[2] LoRa modem-calculator: https://lora-developers.semtech.com/build/tools/calculator
[3] Lycée Dorian: "Caractérisation de l'interface radio LoRa d'un réseau de communication LoRaWAN," eduscol.education.fr: http://www.elektormagazine.fr/lycee-dorian
[4] Officieel radioreglement voor Frankrijk [Franstalig]: https://arcep.fr/uploads/tx_gsavis/21-1589.pdf
[5] Deel 1 van deze serie: http://www.elektormagazine.nl/230140-03

R&S®ESSENTIALS

NEXT-GEN OSCILLOSCOOP: EVOLVED FOR MORE CHALLENGES

Eenvoudig nauwkeurigheid bereiken.

NIEUWE R&S®MXO5-oscilloscoop

De R&S®MXO 5-serie levert baanbrekende oscilloscooptechnologie om uw inzicht in en testen van elektronische systemen te versnellen.

Met beide 4- en 8-kanaals modellen zijn de specificaties van de R&S®MXO 5-serie indrukwekkend, waardoor het instrument zich onderscheidt van andere opties in de branche.

Daarnaast zijn de oscilloscopen uit de R&S®MXO 5-serie het toppunt van baanbrekende technologie door het leveren van snelle en nauwkeurige resultaten. Met aangepaste technologie en baanbrekende functies zijn deze oscilloscopen de optimale instrumenten voor inzicht in circuitgedrag.

Meer informatie op:
www.rohde-schwarz.com/product/mxo5

ROHDE&SCHWARZ
Make ideas real

MEMS-microfoon
ontwerp en constructie

Peter Riccardi (Verenigde Staten)

Je kunt duizenden dollars uitgeven aan een vrije-veld microfoon. Maar kijk voordat je dat doet eerst eens naar dit MEMS-gebaseerde ontwerp, dat uitstekende prestaties biedt tegen een fractie van de kosten.

Akoestici en geluidstechnici vertrouwen op meetmicrofoons om geluidssignalen op te nemen tijdens experimenten. Typische vrije-veld condensatormicrofoons van firma's als PCB Piezotronics kosten meer dan $ 1000. De kwaliteit van zulke microfoons is uitstekend, maar voor een fractie van de prijs zijn alternatieven beschikbaar voor hobbyisten en liefhebbers die de prestaties leveren die je nodig hebt. Hier bekijken we een MEMS-gebaseerd ontwerp met als doel een zo laag mogelijke ruisvloer en een vlakke frequentierespons in de audioband van 20 Hz tot 20 kHz.
Het prototype moet goedkoop zijn, eenvoudig te ontwerpen en te bouwen, en naadloos passen in de typische workflow van experimentele akoestici. Typische akoestische experimenten worden aangestuurd met IEPE DAQ-inputs, dus deze microfoon werkt met IEPE-excitatie [1]. Dit zorgt voor het benodigde vermogen voor de voorversterker en de MEMS-elementen. De technologie van MEMS-microfoons is de laatste jaren verbeterd, dus hun ruisvloer is vrij laag. Analoge middeling door gebruik te maken van een parallelle array zal de ruis verder verminderen; deze werkwijze zal hier worden toegepast.

Elektrisch ontwerp

Er zijn veel soorten MEMS-microfoons die in dit project gebruikt zouden kunnen worden. Hier is gekozen voor de TDK ICS-40300 vanwege zijn ver in het laag doorlopende frequentierespons (door middel van een 'extended back volume') van 6...20.000 Hz, een redelijke gevoeligheid van –45 dBV bij 94 dB SPL, en een lage ruisvloer van –108 dBV. Mechanisch is de microfoon ondergebracht in een behuizing met een nominale diameter van 0,5". Hierdoor heeft hij een kleine vormfactor en kan hij eenvoudig gebruikt worden in een akoestisch lab met bestaande kalibratoren, microfoonstatieven enzovoort. Een BNC-connector aan de achterkant van de behuizing haalt de IEPE-voeding binnen en voert de spanningsgemoduleerde golfvorm uit. We gebruiken een array om de ruisvloer te verlagen. Het doel is een array met vier elementen, wat een maximale ruisverbetering van 6 dB oplevert. Voor een zo groot mogelijk dynamisch bereik tilt de voorversterker het maximaal verwachte uitgangssignaalvan de microfoon op naar de voedingsrail, in dit geval 3,3 V. Volgens de datasheet is de maximale uitgangsspanning 0,355 V_{rms} @ 130 dB SPL. Een paar snelle berekeningen leveren gemakkelijk te begrijpen waarden.
Ten eerste moet de gevoeligheid worden uitgedrukt in de eenheid mV/Pa. Het geluidsdrukniveau (SPL) heeft de vorm:

$$\text{dB SPL} = 20 \log10 (P_{rms}/P_{ref})$$

SPL is een decibelwaarde. P_{rms} is de RMS-waarde (root mean square) van de gemeten druk. P_{ref} is de referentiedruk (20 µPa in lucht). Uit het losse polsje komen we uit op 1,417 Pa_{pk} bij de nominale gevoeligheid van –45 dBV. Nu moet de spanning (in mV) op dezelfde manier worden afgeleid van de gegeven waarde van –45 dBV. Hier wordt aangenomen dat de 'referentie'-spanning 1 V is:

$$\text{dBV} = 20 \log10 (V/1\ V)$$

wat een piekspanning van 5,623 mV_{pk} oplevert. Opmerking: SPL gaat per definitie uit van een RMS-drukgolf. De spanning is in decibel, dus zowel de teller als de noemer van de logaritmefunctie worden verondersteld piekwaarden te zijn. Door de piekspanning te delen door de piekdruk, kan de gevoeligheid worden berekend:

$$\text{gevoeligheid} = 1{,}417\ Pa_{pk}/5{,}623\ mV_{pk} = 3{,}968\ mV/Pa$$

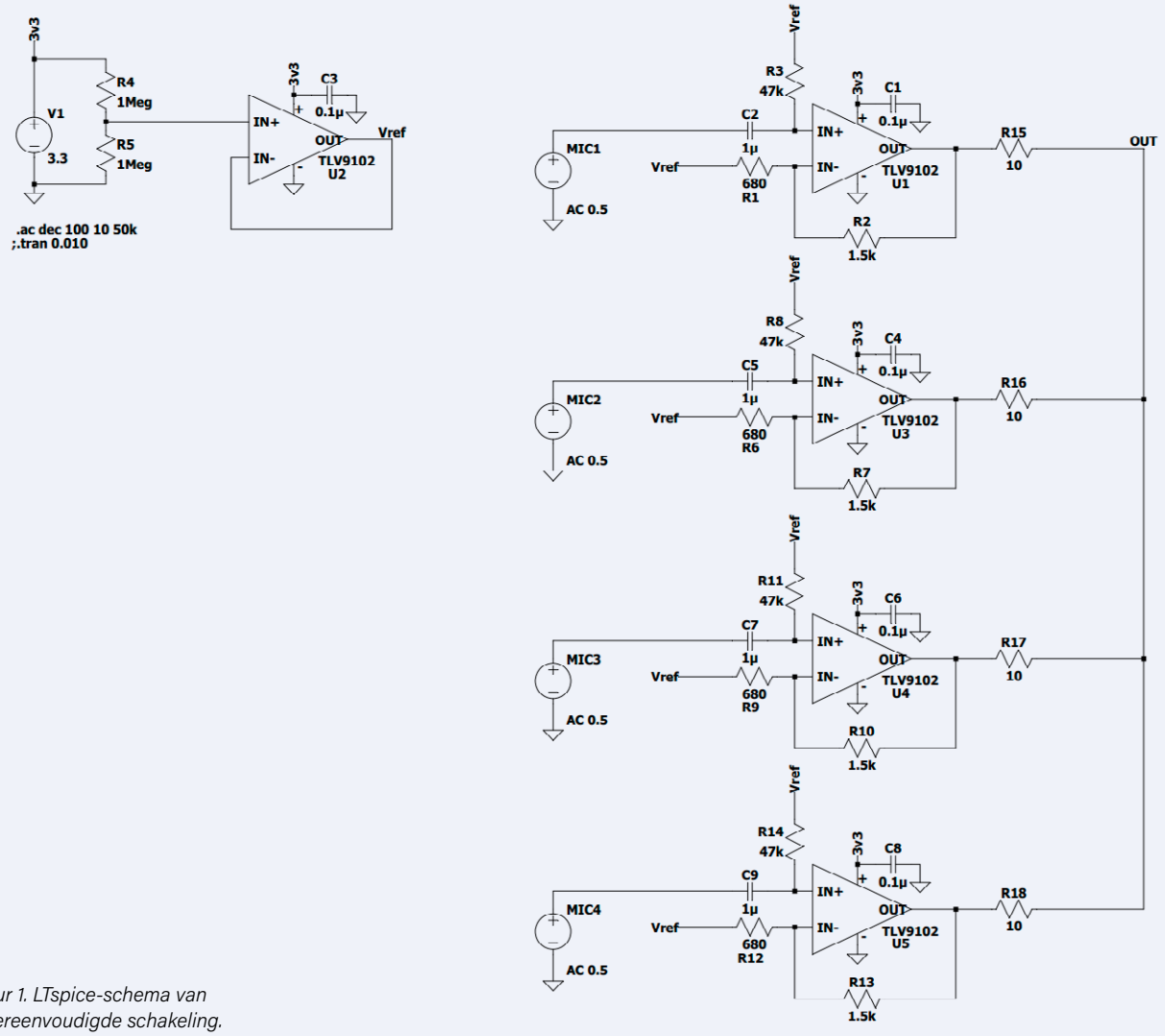
De gevoeligheid wordt vermenigvuldigd met de eventuele versterking door de voorversterker, dus de gevoeligheid kan worden herschreven als:

$$\text{gevoeligheid} = 3{,}968\ mV/Pa * A$$

met

A = versterking

Dit is ver verwijderd van de 'typische' gevoeligheid van 50 mV/Pa, maar is een noodzakelijk compromis om de laagspanning-MEMS-elementen te kunnen gebruiken met een breed dynamisch amplitude-



Figuur 1. LTspice-schema van de vereenvoudigde schakeling.

bereik tot 130 dB SPL. Een typische condensatormicrofoon kan wel 20 V_{pk-pk} bereiken bij modellen voor lagere spanningen. Deze gevoeligheid kan worden verhoogd door de voorversterker wat ectra versterking te laten leveren. Om het dynamische bereik van ons systeem te maximaliseren, moet de headroom in acht worden genomen. We hebben gekozen voor laagspanningsversterkers met een 3,3V-rail. Dit garandeert een laag stroomverbruik, terwijl de spanningszwaai die het systeem kan produceren wordt gemaximaliseerd. De datasheet specificeert de maximale uitgangsspanning van de microfoon bij de hoogste nominale druk die hij kan meten; deze waarde kan worden gebruikt om de benodigde versterking te berekenen. Volgens de datasheet is de maximale uitgangsspanning:

V_{out} = 0,355 V_{rms}

De uitgangsspanning (piek-piek) is ongeveer:

V_{out} = 0,355 * 1,414 = 1 V_{pk-pk}

De totale zwaai van een rail-to-rail opamp die op een enkele 3,3V-voedingsspanning draait is ongeveer 3,3 V. De versterking moet, om die maximale zwaai te bereiken, dus zijn:

$$A = \frac{output}{input} = \frac{3{,}3V_{pk-pk}}{1{,}00V_{pk-pk}} = 3{,}3$$

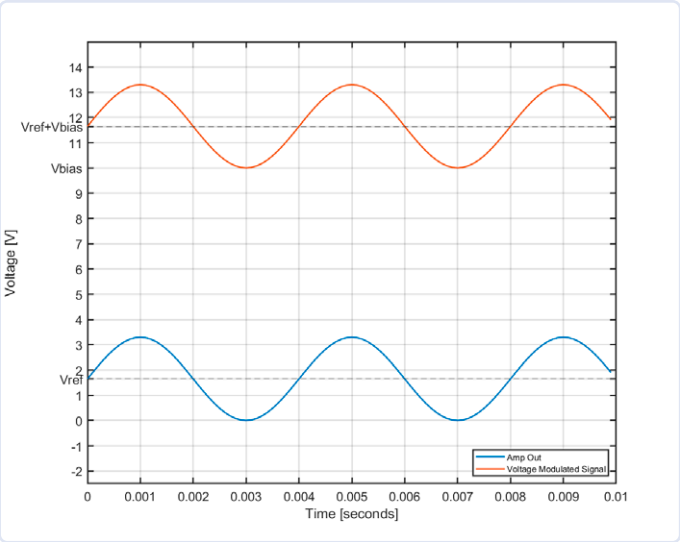
Dit impliceert ook het gebruik van een virtuele massa op 3,3 V/2 = 1,65 V; dat zal daarom de referentiespanning V_{ref} zijn die in dit ontwerp wordt gebruikt. De microfoonelementen kunnen een aanzienlijke DC-offset vertonen, dus de uitgangen van elke microfoon moeten AC-gekoppeld worden via een eenvoudig RC-filter. Hier worden een condensator van 1 µF en een weerstand van 47 kΩ gebruikt, die een kantelfrequentie opleveren van:

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

Deze relatief hoge afsnijfrequentie werd gekozen zodat een kleine 0603-condensator met geschikte werkspanning kon worden gebruikt.

De schakeling

De schakeling van **figuur 1** is een vereenvoudigd schema dat de voorgestelde topologie illustreert. Het uitgangsknooppunt met vier 10Ω-weerstanden middelt de signalen op analoge wijze. Theoretisch zijn de ruis die wordt gegenereerd door alle opamps en de ruis die (elektrisch) wordt gegenereerd in de MEMS-microfoons niet gecorreleerd. Het is dus mogelijk om een maximale verbetering van de ruisvloer van 6 dB te bereiken. Dit wordt echter gecompliceerd door het feit dat de ruis die op de uitgang kan verschijnen niet alleen te wijten is aan de elektronica. De MEMS-microfoons zijn onderhevig aan akoestische ruis door de interactie van luchtmoleculen met de membranen. Het

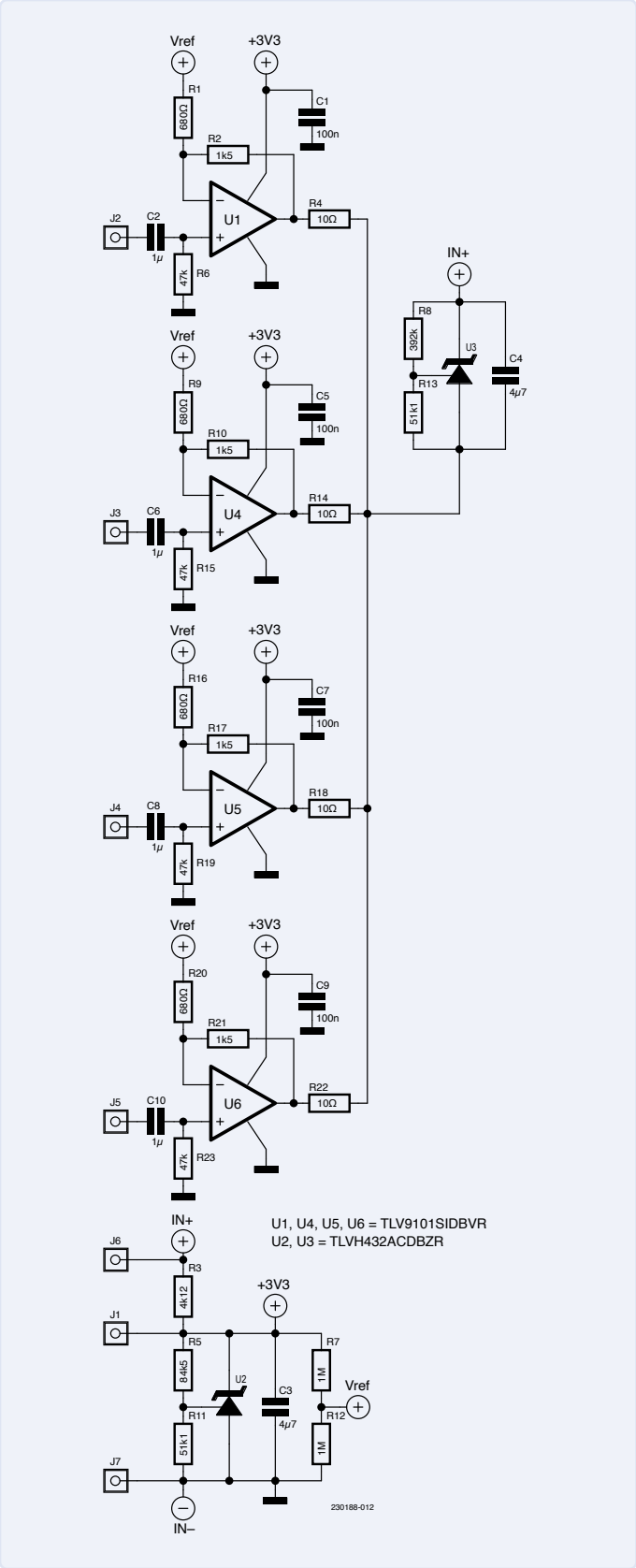


Figuur 2. Typische golfvormen en offset in een door IEPE-gevoed systeem. Hier is een sinus van 250 Hz het geïnjecteerde signaal. Het blauwe spoor is opgenomen van de gemiddelde-uitgang. De uitgang is verschoven naar de referentiespanning V_{ref}, en je ziet dat hij oscilleert rond die DC-spanning. Door die spanning te verschuiven met een andere spanning, V_{bias}, kan de uitgang worden geprogrammeerd voor een gelijkspanning die gelijk is aan ongeveer de helft van de verwachte compliantiespanning van een IEPE DAQ. Als referentie werd de NI 4431 gebruikt, die 2,1 mA levert bij een spanning van meer dan 20 VDC. Daarom werd een spanning rond 10...15 VDC gekozen als werkpunt van het systeem.

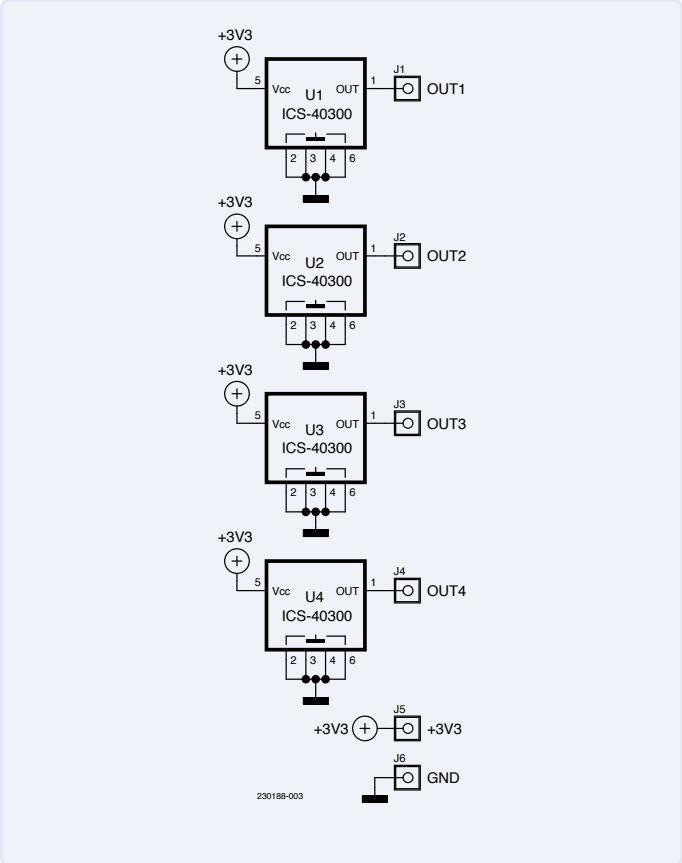
onderwerp ruis in de context van zowel elektrische schakelingen als akoestische systemen is enorm complex en valt ver buiten het bestek van dit artikel. We gaan ervan uit dat de elektrische geluidsbronnen niet gecorreleerd zijn en hopen dat het grootste deel van de akoestische ruis ook niet gecorreleerd is. Op zijn minst zal de niet-gecorreleerde akoestische ruis worden uitgemiddeld. Geïnteresseerde lezers kunnen in [2] en [3] meer informatie vinden over het onderwerp ruis. Een opmerking over figuur 1: van de 3,3VDC-rail wordt met behulp van een gebufferde hoogohmige spanningsdeler een referentiespanning afgeleid die gelijk is aan de halve voedingsspanning. Vier MEMS-elementen staan parallel, elk met hun eigen voorversterker met een nominale versterking van A = 3,2. Het RC-filter verwijdert de DC-offset van de MEMS-elementen en injecteert tegelijkertijd de referentiespanning in de niet-inverterende ingang. De uitgangen van elke opamp zijn aan elkaar geknoopt via kleine weerstanden. Door de ohmse scheiding worden de uitgangsspanningen effectief gemiddeld zonder de uitgangsn kort te sluiten en de uitgangstransistoren te mishandelen.

IEPE-voeding en distributie

Integrated Electronics Piezo-Electric (IEPE) is een slimme voedingsstandaard die in veel data-acquisitiesystemen (DAQ's) wordt gebruikt. Het lost op ingenieuze wijze het probleem op van het leveren van stroom en het ontvangen van een signaal via een tweedraads interface. Dit wordt gedaan door gebruik te maken van de flexibele eigenschappen van een constante-stroombron. Onthoud dat een constante-stroombron – in het ideale geval – een oneindig hoge uitgangsimpedantie heeft. In de praktijk manifesteert dit zich als een zeer steile helling can de V-I curve. Dit betekent dat de stroombron een stroom in de belasting zal persen (de voorversterker en de microfoon) ongeacht de spanning die hij ziet. De voorversterker kan dus de spanning moduleren – de compliantiespanning genoemd – terwijl er nog steeds een constante stroom in de voorversterker zal stromen voor de voedingsrails en -distributie. **Figuur 2** toont een voorbeeldgolfvorm in een IEPE-gebaseerd systeem.

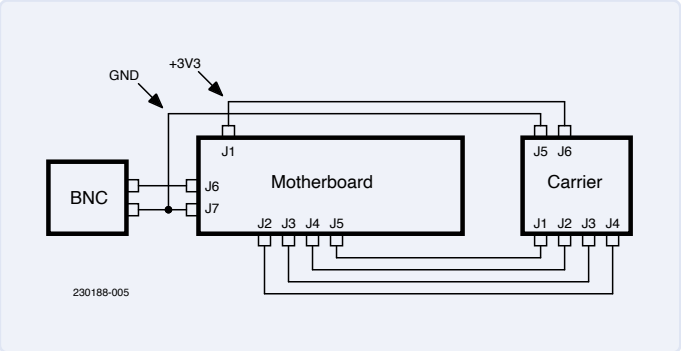


Figuur 3. Het schema van het gebouwde en geteste schakeling. De buffer voor de referentiespanning (zie figuur 1) was in het eerste prototype weggelaten. Dat was een ontwerpfout die problemen veroorzaakt. Laat die buffer dus niet weg als je dit project bouwt. De met 'J' gemerkte aansluitingen zijn through-hole soldeereilanden voor de 'zwevende' bedrading. De BNC-connector in de behuizing is met draden verbonden met de voorversterker. De positieve aansluiting op de connector voedt U2, de 3,3V-regelaar, en voert een spanning die gelijk is aan VIEPE – de ingestelde compliantiespanning. De uitgang van het sommeerknooppunt stuurt een tweede zener-regelaar aan die is ingesteld op ongeveer 10 VDC en produceert zo de totale compliantiespanning zoals geïllustreerd in figuur 2.



Figuur 4. Schema van de MEMS-'carrier' – een kleine ronde print waarop de vier microfoons zijn geplaatst en die een aantal soldeereilandjes heeft voor de uitgangssignalen naar de voorversterker en voor voeding en massa. Er zijn in totaal zes 'I'-aansluitingen: vier uitgangssignalen en 3,3 V en GND.

Figuur 5. De gebouwde microfoon, in een 3D-geprinte behuizing met de afdekking verwijderd. De uiteindelijke behuizing is te groot voor een standaard 0,5"-ontwerp, maar het komt redelijk in de buurt voor een snelle 'proof of concept.'



Figuur 6. Bedradingsschema voor de schakeling zoals hier besproken. De blauwe draden zijn de signalen, zwart is massa en rood is de voeding. Het 'mothderboard' is de voorversterker en op de 'carrier' zitten de vier microfoons.

We hebben een NI 4431 gebruikt als een geschikte 'referentie'-DAQ omdat National Instruments veel gebruikt wordt in akoestisch onderzoek en hun IEPE-bronnen allemaal vergelijkbaar zijn. De 4431 levert 2,1 mA uit en heeft een compliantiespanning van meer dan 20 VDC. Als dat het DC-werkpunt van het systeem binnen deze grenzen ligt, zal de schakeling functioneren. Er moet rekening worden gehouden met voldoende headroom zodat de maximale wisselspanning die op de gelijkspanning is gesuperponeerd niet hoger is dan de gespecificeerde maximumwaarden.

De constante stroom van 2,1 mA kan nu worden gebruikt om de voedingsdistributie te ontwerpen. We gebruiken zener-shuntregelaars vanwege de geringe kathodestroom en het gebruiksgemak. De opamps en MEMS-microfoons verbruiken de meeste stroom, volgens hun datasheets namelijk:

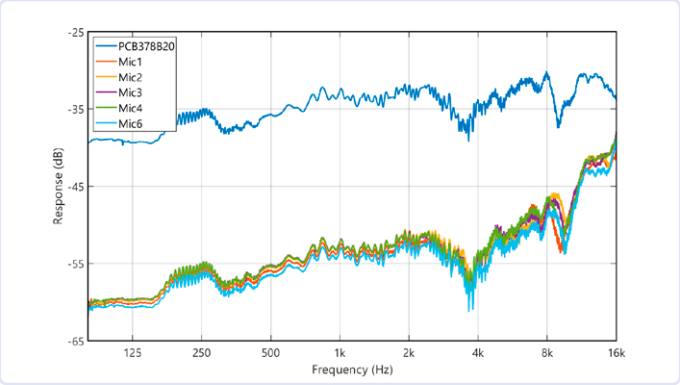
I_q = 150 µA en I_q = 250 µA

Uitgaande van vijf opamps en vier MEM's is de voedingsstroom gelijk aan 1,75 mA. De resterende 350 µA voedt de shuntregelaars. De zener-regelaar die de 3,3V-rail voedt, heeft een weerstand om de kathodestroom in te stellen. De TLVH432 is gekozen als zener-referentie omdat deze instelbaar is. Hij werkt met een kathodestroom van 100 µA. De bias-spanningsregelaar heeft geen serieweerstand om zijn kathodestroom in te stellen. Hij 'absorbeert' eenvoudigweg het verschil tussen de stroom die door de schakeling wordt verbruikt en de 2,1mA-voedingsstroom.

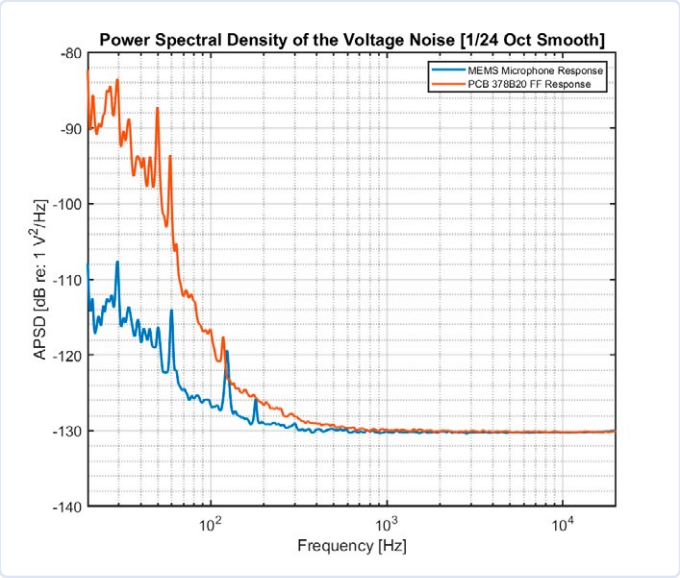
Een uitgebreid voorbeeld van alle berekeningen is te vinden in de application note van Analog Devices [4]. Vanwege leveringsproblemen en moeilijkheden met de verkrijgbaarheid van veelgebruikte zenerreferenties, kan eventueel worden uitgeweken naar een zwevende spanningsreferentie met twee weerstanden en een NPN-BJT van het type 2N2222A (hint: kijk eens naar de 'discrete 741 opamp-schakelingen').

Prototype van voorversterker en microfoon

Figuren 3...6 illustreren het uiteindelijke ontwerp. Er werden twee printen ontworpen, een kleine ronde printplaat voor de vier microfoonelementen en een kleine langwerpige print voor de elektronica van de



Figuur 7. De frequentierespons van vijf MEMS-microfoons vergeleken met een PCB378B20 vrije-veld microfoon. De metingen vonden plaats in een semi-anechoïsche kamer met frequenties boven 200 Hz. De algemene trend van de MEMS-microfoons en de commerciële microfoon zijn vergelijkbaar. De meeste van de pieken zijn niet elektrisch van aard, maar eerder te wijten aan de complexe akoestische interacties van (ongewenste) reflecties van de microfoonstandaard en andere harde oppervlakken in de kamer. Opmerkelijk verschil is de opwaartse trend bij de MEMS-elementen boven 10 kHz, in overeenstemming met de frequentierespons zoals in de datasheet gegeven.



Figuur 8. Spanningsruis gemeten in een semi-anechoïsche kamer zonder geluid en zonder gevoeligheidscorrectie (ruwe spanningsgolfvormen). Boven 1 kHz benaderen zowel de MEMS-microfoon als de commerciële microfoon de ruisvloer van de DAQ.

voorversterker. De schakeling werd na bedrading gemonteerd in een 3D-geprinte behuizing met afmetingen die dicht in de buurt komen van die van een standaard 0,5"-meetmicrofoon. Zie **figuren 7 en 8** voor de meetresultaten.

Conclusies en correcties

Het eerste dat moet worden opgemerkt, is de duidelijke fout in het schema van figuur 3. Het ontwerp in dat schema werd in korte tijd gemaakt om aan de financieringseisen van het oorspronkelijke project te voldoen. Er was geen tijd voor enige vorm van simulatie. Daardoor werd de voor de hand liggende fout van de overbelaste voedingsrail over het hoofd gezien. Hoewel de voedingssstroom van die rail erg klein is, en dus bij normale 'controle' de spanningsdeler 'stijf' genoeg lijkt te zijn, is er nog een ander probleem. De opamps sturen hun uitgangen actief aan via de laagohmige terugkoppeling om de inverterende ingang gelijk te maken aan de niet-inverterende ingang. Er is slechts een weerstand van 680 Ω tussen de niet-inverterende ingang en de uitgang van de deler aanwezig. De spanningsdeler heeft een weerstand van 1 MΩ tussen de aftakking en de gestabiliseerde voedingsrail. Dus in feite stuurt de opamp via zijn laagohmige terugkoppeling dat knooppunt actief aan om het gelijk te maken aan zijn eigen uitgang. Het gevolg is dat het referentieknooppunt de uitgang volgt en in wezen verandert in een spanningsvolger, maar met mogelijke extra storing. Alle metingen zijn uitgevoerd met de originele schakeling zoals getekend in figuur 3. De ruismetingen kunnen dus zeker nog betere resultaten hebben. De geïnteresseerde lezer die de berekeningen uitwerkt, zal misschien de geringe gevoeligheid van de gemeten frequentieresponsfunctie opmerken. Dit komt doordat de versterker slechts eenmaal versterkte, dus de gevoeligheid was ongeveer 10 dB lager. Als dit board opnieuw wordt opgezet, zal voor een goede werking een buffer absoluut nodig zijn.

Bouw

In de toekomst moet de behuizing mechanisch robuuster worden gemaakt. De bouw was vrij moeilijk omdat er verschillende kleine details waren die de minimale wanddikte van een printer met een spuitmondje van 0,4 mm benaderden. De beste oplossing is waarschijnlijk een microfoonontwerp met een nominale diameter van 1". Het was altijd de bedoeling dat de printen voor een eenvoudige montage van flexibel materiaal zouden worden gemaakt. Door tijdsbeperkingen voor het vroege prototype was dit niet mogelijk. Het combineren van de carrierprint en de voorversterker op een enkel ontwerp zonder de handmatige bedrading tussen de twee printen zal de complexiteit sterk vereenvoudigen en de assemblagetijd verkorten. De totale kosten om een van deze units te bouwen lagen rond de $ 30; het gemeten ruisgetal en de frequentierespons zijn verrassend goed, de geringe kosten in aanmerking nemend.

Alle bestanden zijn te vinden in de Hackaday-post van dit project [5].

230188-03 (vertaling: Jelle Aarnoudse)

Opmerking van de auteur

Ik wil het SPRAL-team van de Pennsylvania State University bedanken voor hun hulp bij het verkrijgen van de metingen in de dode kamer, en ik wil in het bijzonder Zane Rusk bedanken voor zijn onvermoeibare steun. Ook wil ik de Acoustical Society of America Chapter aan de Pennsylvania State University bedanken voor hun steun bij het voortzetten van het project en het presenteren van het werk. PCBway sponsorde de bouw van vijf MEMS-microfoons en leverde alle onderdelen gratis. Ik wil hen bedanken voor hun steun aan het project, waardoor afstuderende studenten deze meetmicrofoons zonder kosten konden ontwerpen, bouwen en testen.

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via pjriccardi@pjroses.co of naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.

Over de auteur

Peter Riccardi werkt momenteel in de lucht- en ruimtevaart als avionica-ingenieur (elektronica). Zijn formele opleiding is werktuigbouwkunde, waarin hij in 2018 afstudeerde aan Rowan University. In 2022 behaalde Peter zijn M.S. in akoestiek aan de Pennsylvania State University. Peter is voornamelijk geïnteresseerd in audio-elektronica en elektroakoestiek; zijn onderzoek stelde een lineair equivalent transductiemodel voor van de luchtbewegingstransformator, een nieuw elektro-akoestisch apparaat. Zijn persoonlijke projecten omvatten maatgesneden rackgemonteerde gemonteerde actieve crossover-netwerken met geïntegreerde eindversterkers, voorversterkers voor draaitafels met lage ruis, speciale draaitafels (mechanische ophanging, motordrivers, behuizing enzovoort).

Gerelateerd product

> **Elektor Audio Collection (USB Stick)**
> https://elektor.nl/19892

WEBLINKS

[1] IEPE [Wikipedia]: https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_Electronics_Piezo-Electric

[2] D. Self, "Chapter 1: Basics," Small Signal Audio Design, Focal Press, New York, NY, 2015, pp. 1–16.: https://amzn.to/43dVyTa

[3] T. B. Gabrielson, "Mechanical-Thermal Noise in Micromachined Acoustic and Vibration Sensors," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 40, no. 5, pp. 903-909, May 1993, doi: 10.1109/16.210197: https://ieeexplore.ieee.org/document/210197

[4] Analog Devices, "IEPE-Compatible Interface for Wideband MEMS Accelerometer Sensors," CN-0532, 2020: https://bit.ly/CN-0532

[5] P. Riccardi, "MEMS Based IEPE Powered Instrumentation Microphone," Hackaday.io: https://hackaday.io/project/185762-mems-based-iepe-powered-instrumentation-microphone

Eerst proberen, dan solderen

gratis simulatie- en 3D-ontwerptools

Stuart Cording (Elektor)

Je hebt een geweldig idee voor een schakeling of product hebt, maar wilt eerst wat dingen uitproberen,voordat je naar de soldeerbout en de 3D-printer grijpt. Dan zijn er tegenwoordig meer middelen beschikbaar om je daarbij te helpen dan ooit. Start gewoon de PC of de laptop en ga aan de slag!

In de jaren negentig, toen ik nog studeerde, begon de kracht van de PC als gereedschap naast de soldeerbout zichtbaar te worden. Schakelingen konden in tekstformaat worden beschreven en gesimuleerd met behulp van SPICE. Met een DOS-commando konden blokkerige VGA-grafieken van signalen worden opgeroepen. Met een ander tool, dat onder Windows draaide, konden digitale schakelingen worden gesimuleerd, als de PC tenminste niet crashte tijdens de korte sessie dat we hem mochten gebruiken. Maar buiten de universiteit was er nauwelijks toegang tot zulke geavanceerde gereedschappen. Wie geluk had, kon misschien op het werk gebruik maken van ontwikkelsoftware die daar beschikbaar was.

Vandaag de dag is de situatie compleet veranderd. Er zijn veel gratis ontwikkeltools op de markt met meer dan voldoende mogelijkheden voor de meeste makers om een idee te testen, voordat onderdelen besteld gaan te worden. Andere kunnen voor makers en niet-commerciële activiteiten gratis worden gebruikt, zodat je kunt leren wat je nodig hebt, voordat je besluit om zelf een licentie aan te schaffen. En dankzij de kracht van moderne webbrowsers hoeven sommige tools niet eens te worden gedownload. Gewoon inloggen en aan de slag gaan!

Wokwi

Bij de eerste kennismaking met het online-tool Wokwi [1], is niet meteen duidelijk of deze site krachtig genoeg is om iets zinnigs mee te ontwerpen. Maar schijn bedriegt. Achter de eenvoudige instap ligt een schat van hardware en software verborgen, waarmee ingewikkelde toepassingen met Arduino, Raspberry Pi Pico-, STM32- en ESP32-hardware gesimuleerd kunnen worden. Wokwi kan gratis worden gebruikt, maar alle projecten die je maakt zijn dan voor iedereen toegankelijk. Voor meer privacy en toegang tot geavanceerde mogelijkheden is er de redelijk geprijsde "Wokwi Club". Projecten beginnen met het kiezen van een microcontrollerboard, en daarna worden gebruikers aangemoedigd om te kijken of één van de vele bestaande projecten een goed uitgangspunt kan zijn.

Het venster splitst in twee delen, waarin links traditionele code-ontwikkeling mogelijk is, terwijl rechts een weergave van de hardware te zien is (**figuur 1**). Er zitten allerlei onderdelen in de bibliotheek, van eenvoudige passieve componenten en logische elementen tot complete modules van SparkFun, zeven-segment-displays, LCD's, servo's en IR-afstandsbedieningen en -ontvangers. Je kunt zelfs een debugsessie met de GDB-debugger [2] starten, als je daar vertrouwd mee bent. Anders klik je gewoon op de play-knop om de code te starten en de hardware te simuleren. Displays worden bijgewerkt, LED's knipperen en buzzers zoemen, zodat u alles kunt testen.

De omgeving is goed gedocumenteerd [3], er is een blog met tips en er is een actief Discord-kanaal. Arduino-projecten worden opgeslagen in .ino-formaat, zodat ze gemakkelijk naar de Arduino-IDE kunnen worden overgebracht, en er is ook een library-manager. De schema's

worden opgeslagen in goed leesbaar JSON-formaat. Om je project te documenteren en anderen de kans te geven van je ervaringen te leren, kun je toelichting in markdown-formaat opslaan in een *readme.md*-bestand. Er wordt ook gewerkt aan ondersteuning van de populaire Microsoft Visual Studio Code en een cloud-omgeving voor continue integratie (CI) met automatisch testen.

Aan de slag:

- Arduino-wekker met real-time clock-module: *https://tinyurl.com/alrmclkino*
- ESP32 MQTT-weerlogger in MicroPython: *https://tinyurl.com/espmqttwl*
- Raspberry Pi Pico matrix-toetsenbord met LED's: *https://tinyurl.com/picokeypad*

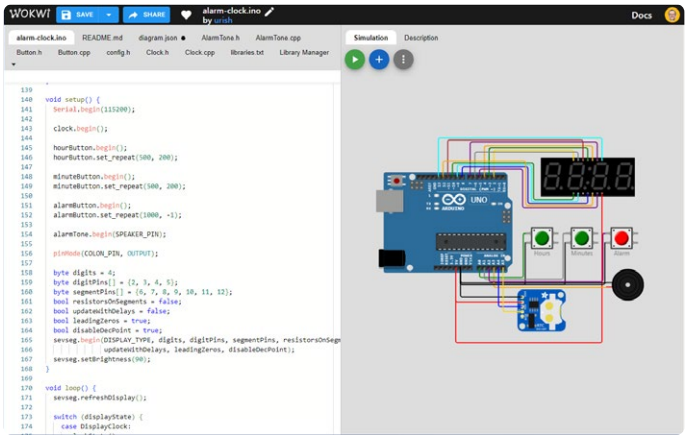
QSPICE

SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) is een tool dat is ontwikkeld door de University of California in de jaren zeventig. Hiermee konden ontwerpers hun analoge schakelingen simuleren, voordat ze die gingen implementeren in silicium. Het programma deed de ingewikkelde wiskundige analyse met behulp van de krachtige numerieke mogelijkheden van de taal FORTRAN. Tegenwoordig is SPICE te vinden in stand-alone tools of verborgen in het backend van ontwerppakketten.

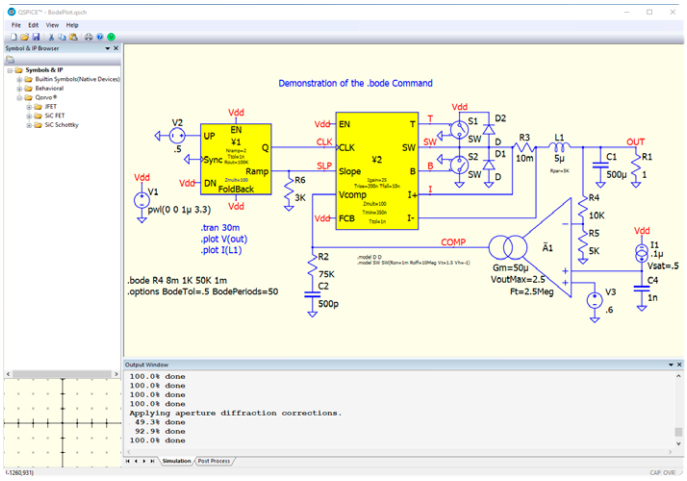
Er is nu een nieuwe versie verkrijgbaar. QSPICE [4] is uitgebracht door Qorvo, een Amerikaans halfgeleiderbedrijf dat zijn portfolio aan het uitbreiden is. Sinds de overname van UnitedSiC in 2021 hebben ze nu ook siliciumcarbide-componenten (SiC). Hun simulatietool is ontwikkeld door Mike Engelhardt, de auteur van het LTspice-tool van Analog Devices (voorheen Linear Technology).

De gebruikersinterface van QSPICE lijkt sterk op die van andere simulatietools: er is een werkblad om schakelingen te tekenen en de simulatie te starten (**figuur 2**). De resultaten worden weergegeven in het tijddomein (**figuur 3**). De interactie met de gebruiker gaat zoals we dat van een Windows-programma mogen verwachten, bijvoorbeeld het in- en uitzoomen met het scrollwiel van de muis. Maar daar houdt de gelijkenis met LTspice op. In een interview heeft Engelhardt ooit uitgelegd dat dit de versie van SPICE is, die hij 25 jaar geleden zou hebben gemaakt met de kennis van nu. De grootste verandering is misschien wel de mixed-mode-simulatie met een compiler voor Verilog (die binnen een C++-bestand is geschreven, zie de *Verilog-Counter*-demo hieronder). Daarmee kunnen digitale apparaten worden geïmplementeerd. Hij vertelde ook dat dit programma de schakeling simuleert, in plaats van de ingewikkelde vergelijkingen op te lossen, zoals andere SPICE-tools doen.

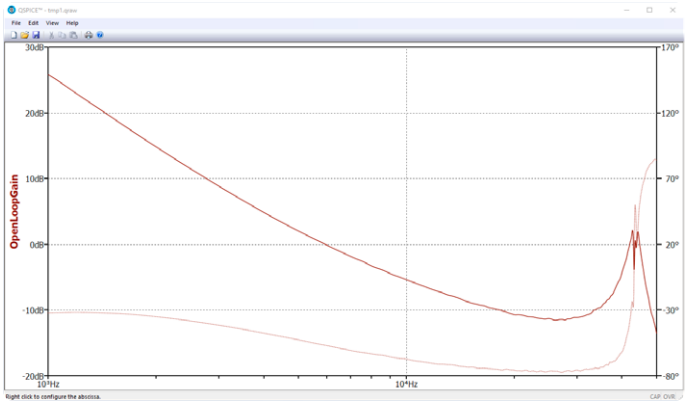
QSPICE gebruikt ook de nieuwste mogelijkheden van Windows, waarmee gemakkelijk de GPU kan worden benaderd via een gestandaardiseerde software-API. Daardoor kan tijdens de simulatie de data van de golfvorm worden gebruikt zoals die wordt geleverd, en is geen compressie nodig. De weergave van schema's en simulatieresultaten is ook sterk verbeterd. Een ander voordeel is de snelheid: het programma is bij benchmarks sneller dan andere en doorstaat alle tests; een foutpercentage van 15% is typisch voor dit soort tools.



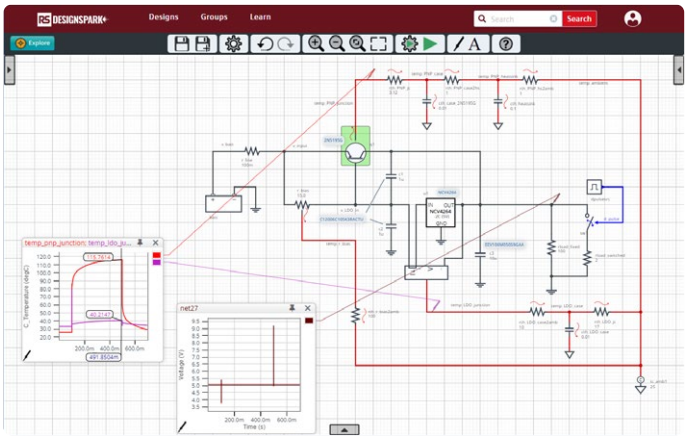
Figuur 1. Wokwi heeft een eenvoudige gebruikersinterface. Je kunt je concentreren op de code links) en de schakeling (rechts).



Figuur 2. QSPICE heeft een vertrouwde ontwerpinterface; je GPU verbetert de simulatiekracht.



Figuur 3. De output van de simulatie, hier een Bodediagram, is vertrouwd maar met een hogere resolutie dan bij andere SPICE-tools.



Figuur 4. De thermisch aspecten van een schakeling kunnen ook worden gesimuleerd in DesignSpark's online Circuit Simulator.

Een belangrijke verbetering van de simulatie heeft te maken met de verzadiging van componenten zoals SiC-JFET's en galliumnitride-schakelaars (GaN) in het 'aan'-gebied. Qorvo hoopt dat dit zal helpen bij het ontwikkelen van geavanceerde powermanagement-systemen. Op dit moment worden 1000 componenttypen ondersteund en er zijn 20 voorbeeldprojecten.

Aan de slag:
Kies in het menu *File → Open → Demo…* en dan:

- Probeer de digitale simulatie van een teller met *VerilogCounter.qsch*
- Onderzoek een resonerende schakelende voeding (SMPS) met *SMPS.qsch*
- Genereer een Bodediagram met *BodePlot.qsch*

DesignSpark Circuit Simulator

Het programma DesignSpark van RS Components bestaat al meer dan tien jaar. Er is een hele community van gebruikers omheen ontstaan. Ze kunnen beschikken over verschillende gratis tools voor printontwerp en 3D-modellering, plus abonnementen voor toegang tot geavanceerde functies. Deze lijst omvat nu ook Circuit Simulator [5], een webtool van Siemens PartQuest Explore. Dit ondersteunt analoge, digitale en gemengde schakelingen, maar het meest opvallende is de multi-domein simulatie.
De meeste simulatoren simuleren aan de hand van het schema. Je kunt rustig meerdere ampères door een kleinsignaaldiode pompen, hoewel die in werkelijkheid binnen een seconde in rook zou opgaan. Bij multi-domein simulatie worden ook thermische en mechanische effecten meegenomen.
Dat is het gemakkelijkst uit te leggen aan de hand van één van de beschikbare voorbeeldschakelingen. Het project *Current Boost Regulator* met een Onsemi NCV4264 LDO levert 5 V in een belasting van 100 Ω. Een extra testschakeling schakelt een belasting van 2 Ω aan en uit, wat leidt tot inzakken en herstellen van de uitgangsspanning. Rond dit schema is ook een thermisch circuit geconstrueerd (**figuur 4**). Dit bestaat uit de warmte die door een transistor wordt gegenereerd plus een *Electrical Power to Heat Flow*-element dat tweebenige componenten zoals de LDO omgeeft.
Natuurlijk moeten we voor zo'n simulatie de thermische eigenschappen van de schakeling, zoals de warmtegeleiding door de print, begrijpen. Daar heeft niet iedereen ervaring mee. Het tool kent verschillende thermische en elektrothermische componenten zoals transistoren en diodes met elektrothermische interfaces, een thermisch Cauer-netwerk en een thermo-elektrische Peltier-koeler.
Er zijn ook magnetische en elektromechanische componenten, zoals elektromagneten, lineaire DC-motoren en driefasemotoren. Je kunt ook zelf componenten toevoegen aan je bibliotheek. Dat kan bijvoorbeeld door de essentiële gegevens uit de datasheet van de component in te voeren, of ze te beschrijven met SPICE of VHDL-AMS [6].
Voor alle Design Spark-tools moet je een account aanmaken. Met het gratis Explorer-plan is de duur van de simulatie beperkt tot één minuut. Met een betaald account is simulatie tot 60 minuten mogelijk. Een leuke functie is de mogelijkheid om je ontwerp op te nemen in je eigen website, waar bezoekers dan probes kunnen aansluiten om de simulatie van je ontwerp zelf te onderzoeken.

Aan de slag:
Maak een account aan, log in en bekijk:

- Een open-loop stappenmotor-controller: *https://tinyurl.com/pqolstct*
- Een elektrisch stuursysteem met een PMSM-motor: *https://tinyurl.com/pqpowerst*
- Een hydraulische autobrug met een driefasen-motorpomp: *https://tinyurl.com/pqcarlift*

Shapr3D

Met de komst van 3D-printers ontstond de behoefte aan tools om 3D-objecten te ontwerpen. Een populair tool was SketchUp [7] van een software-startup die is opgekocht door Google om gebouwen aan Google Earth toe te voegen. Nu, twintig jaar later, is de gratis versie van SketchUp alleen beschikbaar als online-tool. Het voelt onhandig aan en het lijkt niet veel veranderd.
Het probleem met 3D-tools is dat ze lastig te gebruiken zijn op de 2D-monitors waar we mee werken. Dat is iets dat Shapr3D [8] overtuigend oplost. Het is verkrijgbaar als een app voor Windows of Mac, of via de App Store voor iPad. Na registratie kan de software worden gedownload. De gebruikersinterface laat duidelijk zien welke 3D-tekenmogelijkheden er beschikbaar zijn. Maar het slimme is dat je naadloos kunt overschakelen naar een 2D-schets door op de spatiebalk te drukken; dat voorkomt de verwarring die vaak ontstaat door rendering in perspectief. Dus als je ervaring hebt met technisch tekenen op papier, kun je op een comfortabele manier beginnen.
Maar als je liever met een 3D-tekening begint, komt je ook aan je trekken (**figuur 5**). Afmetingen en hoeken zijn gemakkelijk aan te passen nadat een object is getekend of een vlak is opgedikt, net als de afronding van hoeken. Cirkels worden centraal geplaatst met een concentrisch gereedschap, zelfs als alleen een boog beschikbaar is als referentie. En voor de nauwkeurigheid is er ook een instelbaar ('magnetisch') raster.

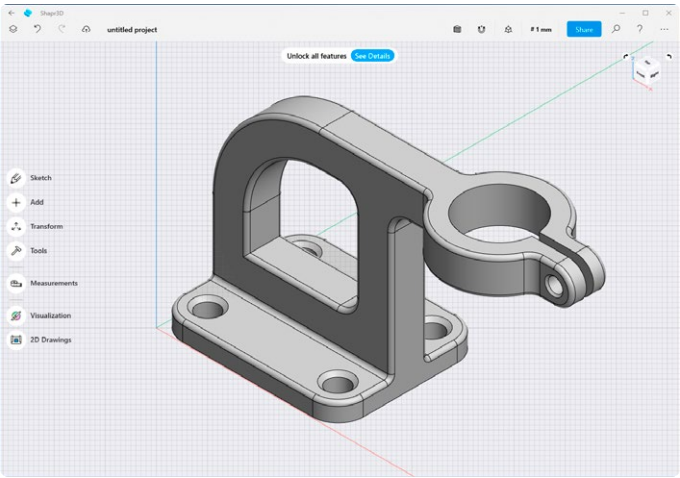
De geavanceerde functies kunnen ook worden uitgeprobeerd. Een bestaand 3D-model kan bijvoorbeeld worden omgezet in een constructietekening, of je kunt materiaal-eigenschappen toepassen op een oppervlak om een idee te krijgen voor de aanblik van het eindproduct (**figuur 6**). Met de gratis versie kunnen modellen worden geëxporteerd als STL- of 3MF-files, maar alleen in de laagste resolutie. Anders worden je bestanden opgeslagen in de cloud.

Aan de slag:
We hebben voor de test een eenvoudig voorwerp in STEP-formaat [9] gedownload van GrabCad [10], dat veel modellen aanbiedt in zijn bibliotheek.

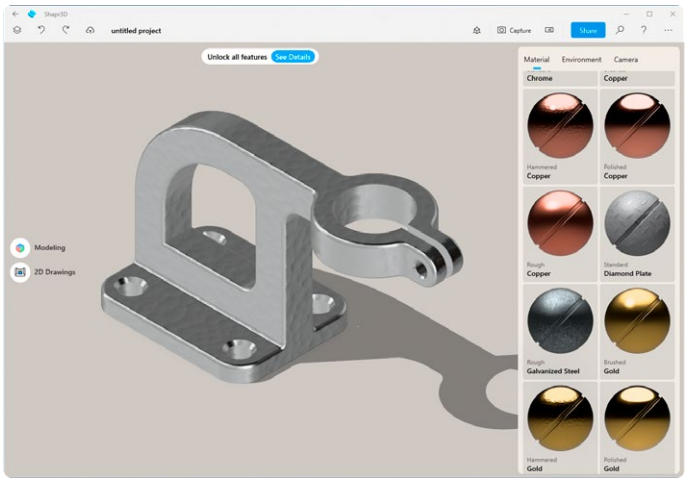
Eerst testen, dan bouwen

National Semiconductor's beroemd/beruchte analoge ingenieur Bob Pease, zei altijd dat zijn favoriete programmeertaal de soldeerbout was. En daarmee heeft hij niet helemaal ongelijk: iets bouwen geeft meer bevrediging dan het alleen te simuleren. Maar als je de onderdelen niet hebt, of alleen een idee wilt onderzoeken op uitvoerbaarheid, kun je met al deze gratis tools aan de slag, voordat je iets hoeft te bestellen.

230512-03 (vertaling: Evelien Snel)



Figuur 5. De gebruikersinterface van Shapr3D is zeer intuïtief en ondersteunt een naadloze overgang tussen 3D- en 2D-tekenen.



Figuur 6. Je kunt de oppervlakte van 3D-modellen materiaal-eigenschappen geven. De gratis versie slaat de gekozen materialen niet op.

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een email naar de auteur via stuart.cording@elektor.com of naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.

Over de auteur

Stuart Cording is technicus en journalist met meer dan 25 jaar ervaring in de elektronica-industrie. U kunt veel van zijn recente Elektor-artikelen vinden op *www.elektormagazine.com/cording*. Naast het schrijven voor Elektor presenteert hij een regelmatig livestream-interviews: Elektor Engineering Insights (*www.elektormagazine.com/eei*).

WEBLINKS

[1] Wokwi: https://wokwi.com
[2] GDB Debugger-project: https://sourceware.org/gdb
[3] Wokwi-documentatie: https://docs.wokwi.com
[4] Qorvo QSPICE: https://tinyurl.com/qspicesimulator
[5] DesignSpark Circuit Simulator: https://tinyurl.com/designsparkcs
[6] VHDL-AMS op Wikipedia: https://tinyurl.com/wikivhdlams
[7] SketchUp: https://sketchup.com
[8] Shapr3D: https://shapr3d.com
[9] Voorbeeld van een 3D-model: https://tinyurl.com/bracketmount
[10] GrabCAD: https://grabcad.com

Nieuwe tools van Microchip!

PICkit 5 en MPLAB ICD 5 nu verkrijgbaar!

Tam Hanna (voor Microchip)

De dagen dat elektronicaliefhebbers zelf hun programmers in elkaar knutselden om PIC's en soortgelijke microcontrollers te programmeren, zijn al lang voorbij. Microchip heeft onlangs de nieuwste PICkit 5 In-Circuit Debugger/Programmer geïntroduceerd, die niet alleen niet duur maar ook compatibel is met veel van de Microchip controllerfamilies. Voor professioneel debuggen is ook de krachtige MPLAB ICD 5 In-Circuit Debugger/Programmer beschikbaar. Dit artikel verkent de nieuwe mogelijkheden en laat zien hoe de nieuwe versies kunnen worden geïntegreerd in een bestaande ontwikkelomgeving.

Nu met USB-C!

Microchip heeft zich altijd ingezet om de 'kabelwirwar' in de labs van MPLAB-gebruikers te verminderen. De eerdere ICD 3-variant gebruikte een USB-A connector, terwijl de PICkit 4 werd geleverd met een micro-USB connector.

Standaardisatie in de wereld van USB-connectoren betekent nu dat zowel de PICkit 5 [1] als de ICD 5 [2] worden geleverd met een USB-C connector, die de standaard wordt voor alle moderne smartphones. Universele invoering zal er uiteindelijk voor zorgen dat al die verschillende USB-kabels tot het verleden zullen behoren.

Voor eigenaars van deze apparaten heeft dit verschillende voordelen. Ten eerste is het voor een ontwikkelaar nu eenvoudig om dezelfde kabel die je gebruikt om je smartphone op te laden te gebruiken om verbinding te maken met je ontwikkelomgeving. Dit bespaart ruimte – en soms geld – op zakenreizen omdat je USB-C kabels bijna overal kunt lenen vanwege het wijdverbreide gebruik in de smartphone-industrie.

De tweede innovatie heeft specifiek betrekking op bezitters van de 'grotere' programmeervariant, de ICD 5. Omdat die krachtiger is, kan de ICD 5 tot 1 A aan de applicatie leveren. Hierdoor is het in veel gevallen niet meer nodig om een tweede voeding mee te nemen voor het te testen apparaat. De Pickit 5 is nog steeds beperkt tot een maximale stroom van ongeveer 150 mA – waarschijnlijk een concessie aan de aanzienlijk kleinere hardware.

Wat betreft de werkelijke programmeersnelheid zijn er geen significante voordelen met USB-C – beide programmers werken nog steeds op 'slechts' de USB 2.0 High Speed-bitrate, maar dit zou in de praktijk geen groot probleem moeten zijn, gezien de beperkte omvang van de meeste microcontroller-geheugens. Hardware-optimalisaties verbeteren daarentegen de snelheid zoals de gebruiker die 'ervaart'.

En PoE!

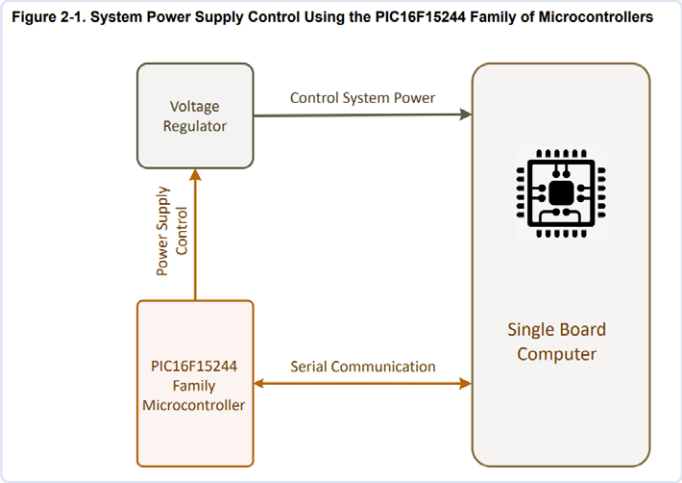
Bij het ontwikkelen van toepassingen met hoogspanningssecties in het ontwerp is het belangrijk om te zorgen voor een goede elektrische scheiding tussen het hoogspanningsdeel en de rest van de schakeling, inclusief processor, laagspannings- en sensorsignalen. Een voordeel van het gebruik van een communicatielink zoals een Ethernet-netwerk is dat het meestal gebruik maakt van scheidingstransformatoren bij elke netwerkaansluiting om de datasignalen galvanisch te isoleren. Dit zorgt voor een goede isolatie tussen je dure werkstation of PC en elk extern apparaat.

De ICD 5 heeft een netwerkpoort aan de achterkant (**figuur 1**). Nieuw is dat hij nu de 'hele applicatie' van stroom kan voorzien via Power over Ethernet (PoE), mits dit op de juiste manier is geconfigureerd in je PoE-netwerk. Dit kan een aanzienlijke stroom leveren aan de applicatie en betekent dat je geen extra netadapter nodig hebt om die te voeden. Gelukkig is MPLAB X ook voorbereid om rechtstreeks met de ICD 5 te communiceren via het internet, dus je hoeft geen extra USB-C kabel aan te sluiten tussen je PC en het programmeerapparaat.

Het is de moeite waard om op te merken dat deze opstelling ook experimenten met Continuous Integration en Continuous Delivery aanmoedigt, hoewel oudere versies van het programmeerapparaat vergelijkbare functionaliteit boden als ze werden gebruikt met een Ethernet-verbinding en een 9V-netadapter.

De netadapter die werd meegeleverd met eerdere versies van de ontwikkelkit maakt geen deel meer uit van het pakket in versie 5. Dit geeft aan dat stroom ook kan worden verkregen via de grotere stroomcapaciteit die USB-C of USB 3.0 poorten hebben in vergelijking met eerdere USB-incarnaties.

Figuur 1. Deze poort biedt ook Power over Ethernet.



Figuur 2. Zelfs een management-microcontroller heeft firmware nodig! (Bron: [3])

PICkit 5: verbeterde functionaliteit

De eigenlijke ontwikkeling van een elektronisch systeem is vaak slechts het eerste deel van een complexe waardeketen. Wie niet vanaf het begin rekening houdt met 'Design for Manufacturing' – en soortgelijke aspecten – kan tijdens de productie met onverwacht hoge kosten of problemen worden geconfronteerd.

Een goed voorbeeld zijn systemen die een 'management microcontroller' combineren met een procescomputer, zoals beschreven in Application Note AN4121 [3] en schematisch samengevat in **figuur 2**. Een verkeerde planning, zoals het slecht positioneren van de programmeerpoort van de microcontroller, kan de assemblage- en productonderhoudskosten aanzienlijk beïnvloeden.

Terwijl ontwikkelaars firmware kunnen leveren aan elke afzonderlijke print van een prototypesysteem met MPLAB, wordt deze methode tijdrovend en onwerkbaar wanneer het apparaat in productie gaat.

Met de PICkit 5 en zijn functie *Programmer-To-Go* biedt Microchip een oplossing. In wezen is deze functie al voor meerdere versies beschikbaar, maar hier zit het geheim in de microSD-sleuf in **figuur 3**, waarin een FAT32-geformatteerde geheugenkaart past.

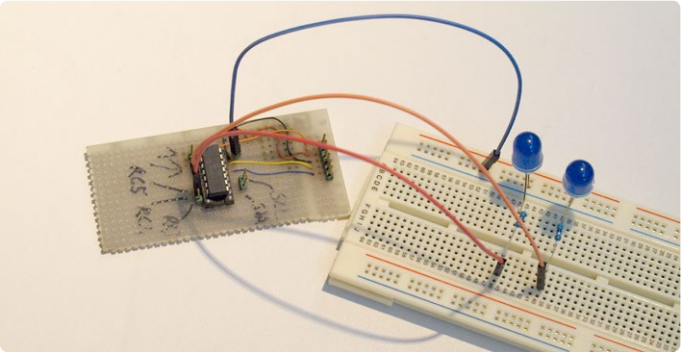
Met MPLAB kunnen ontwikkelaars een firmware-image definiëren om automatisch uit te rollen, waarna de programmeeradapter het met minimale inspanning aan aangesloten doelapparaten kan leveren.

Wat ook nieuw is bij de PICkit 5 is de mogelijkheid om meer dan een firmware-image te kopiëren naar de *Programmer-To-Go* opslagruimte. Hierdoor kan een programmeerapparaat worden gebruikt voor de 'parametrering of eindassemblage' van meerdere printen. Opstarten van het programmeerproces vindt plaats via de bekende knop verborgen onder het logo aan de voorkant van het apparaat, dus de selectie van het image moet via een andere communicatie-interface worden gedaan.

...en vriendjes met de Bluetooth-radiostandaard

Om de nieuwe programmeerapparaten in te stellen, heb je de ontwikkelomgeving MPLAB versie 6.10 of hoger nodig – het eigenlijke installatieproces is vrij standaard, zoals je van MPLAB mag verwachten. Naast de typische installatie van de XC8-compiler, die Microchip traditioneel apart uitvoert, moet je ervoor zorgen dat je MPLAB tijdens het opstarten toegang geeft tot zowel lokale als externe netwerken in de Windows-firewall. Dit is vooral belangrijk als je van plan bent de grotere versie van de programmer met Ethernet-aansluiting te gebruiken.

Figuur 3. De houder voor de geheugenkaart.



Figuur 4. We gebruiken dit oude board als testsysteem.

Voor de volgende stap heb je een SD-kaart nodig. Ik heb een reservekaart van 16 GB gebruikt en deze geformatteerd met een FAT32-partitie onder Ubuntu. Zoek naar een speciale functie van de Disk Management snap-in; een eigenaardigheid van de app is dat die niet standaard een partitie aanmaakt, dus je moet dat apart doen.

Voor deze opstelling gebruik ik een hardware-testopstelling van een PIC16F1503-gebaseerde controllerprint die over is van een recent adviesproject voor de auto-industrie (**figuur 4**).

In de eerste stap kies je zoals gewoonlijk de optie *File → New Project* om een project voor de XC8-compiler te genereren. Start vervolgens de MCC om een basisproject te genereren. In deze beschrijving ga ik ervan uit dat je al op de hoogte bent met PIC-programmering, dus ik zal niet in detail ingaan op de algemene bediening.

Niet voor Windows 7

Het is belangrijk om te weten dat Microchip expliciet afraadt om de vijfde versie van hun programmers met Windows 7 te gebruiken. Ik heb voor dit artikel uitsluitend PC's met Windows 10 of 11 gebruikt. Er circuleren echter enkele geruchten op het internet die over het algemeen beweren dat het 'werkt', tenminste wanneer de programmer regelmatig kan worden aangesloten op een computer met Windows 10 of Windows 11, waar MPLAB dan diverse firmware-upgrades en huishoudelijke taken uitvoert.

Het enige cruciale punt is dat twee GPIO-pinnen als uitgangen moeten worden gedeclareerd. In de volgende stappen zal ik de pinnen RC4 en RC5 als uitgangen definiëren en vervolgens de code genereren.

Om de verschillen te verduidelijken, zal ik een programma schrijven dat een specifiek patroon volgt binnen dit voorbeeldprojectskelet, dat ik *RunMeQuick1* heb genoemd. Dit programma schakelt de twee LEDs aan en uit in een relatief laag tempo.

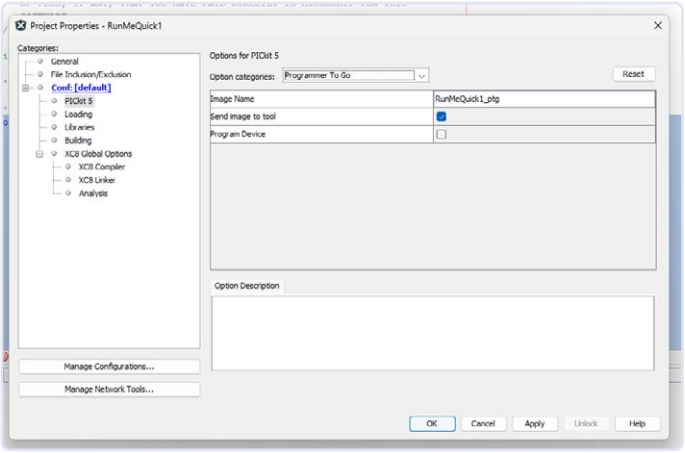
```
void main(void)
{
    // initialize the device
    SYSTEM_Initialize();

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

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

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

In de volgende stap open je *Project Properties*, waar je de instellingen vindt voor het configureren van de *Programmer-To-Go* bewerking, zoals getoond in **figuur 5**.
Het cruciale aspect hier is de sectie *Image Name*, de naam die MPLAB toekent aan het uitgeschreven bestand. De optie *Send image to Tool* instrueert de IDE om de gegenereerde data naar de microSD-kaart van het aangesloten programmeerapparaat te schrijven.
Het aanvinken van het vakje *Program Device* is optioneel; het bepaalt of, naast de 'eigenlijke' functie *Programmer-To-Go* een aangesloten PIC-microcontroller geprogrammeerd moet worden met de meegeleverde data.
Het gebruik van deze optie kan bijvoorbeeld zinvol zijn als je zowel het *Programmer-To-Go*-image wilt bijwerken en ook de huidige firmware op een evaluatiekaart wilt laden voor een laatste test.

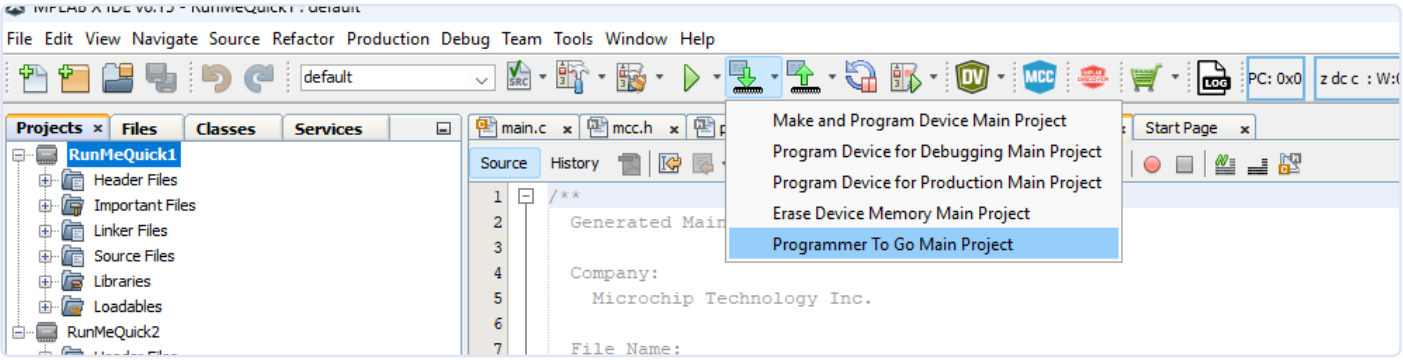


Figuur 5. MPLAB helpt ontwikkelaars door de Programmer-To-Go-modus te configureren.

De eigenlijke installatie moet dan – beslist – worden uitgevoerd via het menu in **figuur 6** dat een 'update' van het *Programmer-To-Go* image initieert.
Tijdens de installatie verschijnt er soms een foutmelding in de trant van *Transmission on endpoint 2 failed (err = -109)*. In mijn geval kon dit probleem bijna altijd worden opgelost door de PC opnieuw op te starten. Overigens, als je net MPLAB hebt geïnstalleerd, is het ook aan te raden om dan opnieuw op te starten. De installatie is voltooid wanneer de statusconsole het bericht *The debug tool is in programmer to go mode* toont.
In de volgende stap gaan we terug naar de MPLAB startpagina om een ander – bijna identiek – project te maken, *RunMeQuick2* genaamd. Dit illustreert de verbeteringen in de tweede generatie PICkit 5. Eerst moeten we de MCC opnieuw starten. De code die de twee signaal-LEDs moet aansturen ziet er nu als volgt uit:

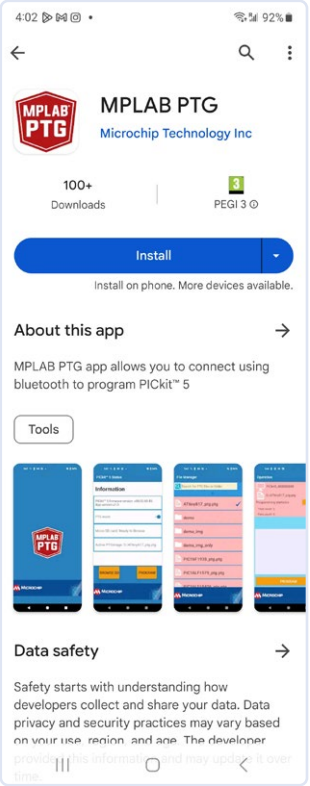
```
void main(void)
{
    . . .

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

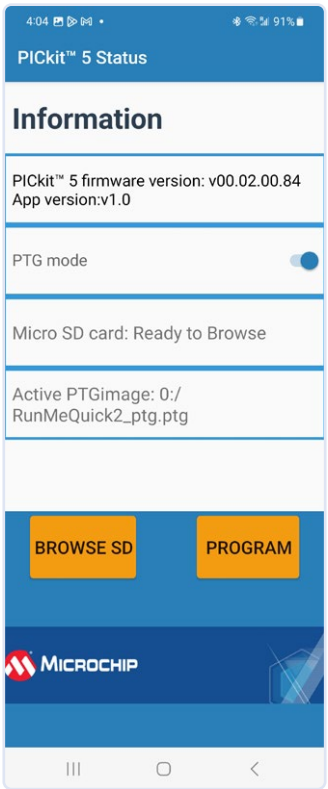


Figuur 6. Dit item zet het bestand over naar de SD-kaart.

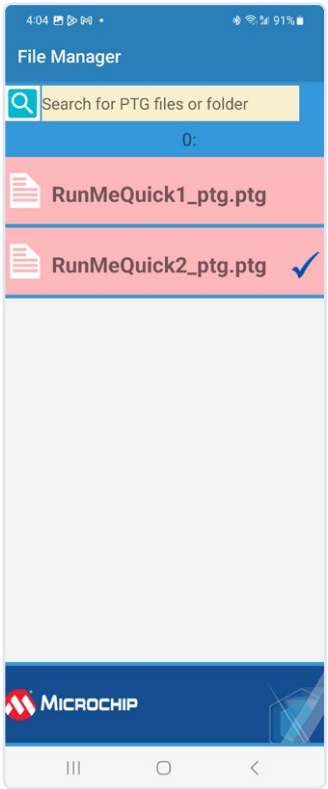
Om de aangesloten PICkit te configureren, moet je logischerwijs weer een bewerking uitvoeren die ook zou moeten eindigen met de statusmelding *The debug tool is in programmer to go mode*.
Nu kun je de programmer loskoppelen van je werkstation. Ik heb een gewone telefoonlader gebruikt om de PICkit op dit punt van stroom te voorzien. De knipperende felgroene LED geeft aan dat het apparaat in de *Programmer-To-Go* modus staat, wachtend op instructies.
Vervolgens openen we de Play Store van Android of de App Store van Apple om de nieuwe besturingsapp te downloaden, die alleen compatibel is met de Bluetooth-module van de PICkit 5. In de volgende stappen gebruik ik een Samsung-smartphone; de app verschijnt in de Play Store zoals te zien in **figuur 7**.
Als je Bluetooth LE gebruikt, moet je er rekening mee houden dat het programma verschillende malen om toestemming vraagt tijdens de eerste start – dit is nodig vanwege de vereisten van Google; het is verder niet kritisch en kan ook niet omzeild worden.



Figuur 7. Deze app vereenvoudigt het remote programmeren.



Figuur 8. Het startmenu…



Figuur 9. …en een selectie van uitrolbare images.

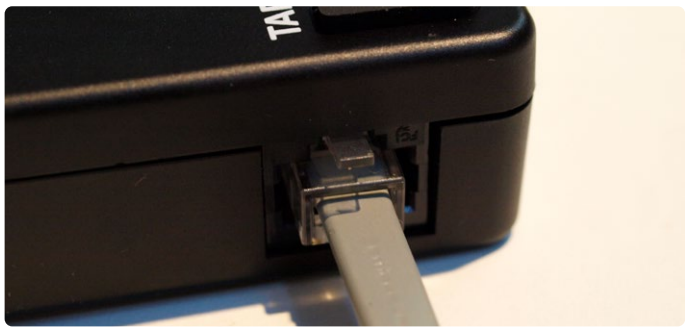
In de volgende stap verschijnt het scan-dialoogvenster met een lijst van alle apparaten die in de buurt zijn gevonden – in mijn geval moest ik tijdens het uitvoeren van de tests soms op de *Cancel*-knop klikken voordat ik toegang kreeg tot de lijst met gevonden programmers.
Na het voltooien van deze taken toont het systeem de schermen van **figuur 8** en **figuur 9**, zodat je de gewenste firmware direct kunt uitrollen naar de aangesloten apparaten.
Tegenwoordig heeft zo ongeveer iedereen een smartphone, en zo ongeveer iedereen is vertrouwd met de GUI daarvan. Het gebruik van de applicatie op zo'n telefoon geeft beginners een voorsprong op degenen die vanaf nul beginnen met de vaak complexere Project Explorer van MPLAB op een desktop-PC. Het is vermeldenswaard dat een smartphone bijna altijd binnen handbereik is, zodat het (relatief krachtigere) werkstation eigenlijk niet meer nodig is – vooral bij grote opstellingen kan dit de kosten aanzienlijk drukken.

Het upgraden van mijn ontwikkelomgeving

Als volgende experiment keren we terug naar mijn Windows 10-werkstation dat ik onder andere heb gebruikt om het boek te schrijven waar in het **kader** naar wordt verwezen. Standaard is MPLAB versie 5.45 geïnstalleerd op deze machine, die ik normaal gebruik voor mijn commerciële activiteiten.
Nu is het tijd om weer eens een bezoekje te brengen aan de MPLAB-website, om versie 6.15 te downloaden. De nieuwste versie van MPLAB kan zonder meer naast elke bestaande versie worden geïnstalleerd.
Nadat het installatieproces met succes is voltooid, biedt MPLAB 6.15 aan om de instellingen van de vorige versie te gebruiken als basis voor het configureren van de nieuwe installatie. Zoals altijd moeten diverse instellingen in de Windows-firewall worden bevestigd. De eigenlijke IDE start na het downloaden van de Microchip Offline Help-component.
Na de eerste start van de IDE volgt een uitgebreid parsing-proces dat onder andere alle projectbestanden probeert bij te werken. Daarnaast worden diverse caches in MPLAB X bijgewerkt en gevuld met informatie uit de projecten.
Voor de volgende stap heb ik gekozen om de demo *CH9-Demo1* te installeren en het board, bekend uit mijn boek, aan te sluiten op de programmer en de PC. Het compileren ging goed, maar het daadwerkelijk installeren van de firmware mislukte soms onder Windows 10 met de eerdergenoemde foutmelding *Transmission on endpoint 2 failed (err = -109)*. Afgezien hiervan integreert de nieuwe versie van PICkit 5 naadloos in mijn bestaande ontwikkel-workflow en dankzij optimalisaties is de uitrol van code in veel gevallen zelfs sneller.

Meet de stroom met de ICD5

Microchip is al enige tijd bezig om zijn MPLAB IDE uit te breiden met diverse handige extra functies, met als doel het voor ontwikkelaars eenvoudiger te maken om meet- en trackingdata te visualiseren die door de embedded toepassing worden gegenereerd.
Een van de interessante eigenschappen van de ICD 5 is dat deze de datavisualisatie-engine van MPLAB kan voorzien van informatie over het stroomverbruik van de aangesloten applicatie. De specificatie heeft een resolutie van 0,29 µA – meer meetinformatie voor de vermogensmonitor staat in **tabel 1**.



Figuur 10. Een klein ongemak bij het gebruik van de ICD 5.

Tabel 1. De nauwkeurigheid van de vermogensmonitor (volgens Microchip).

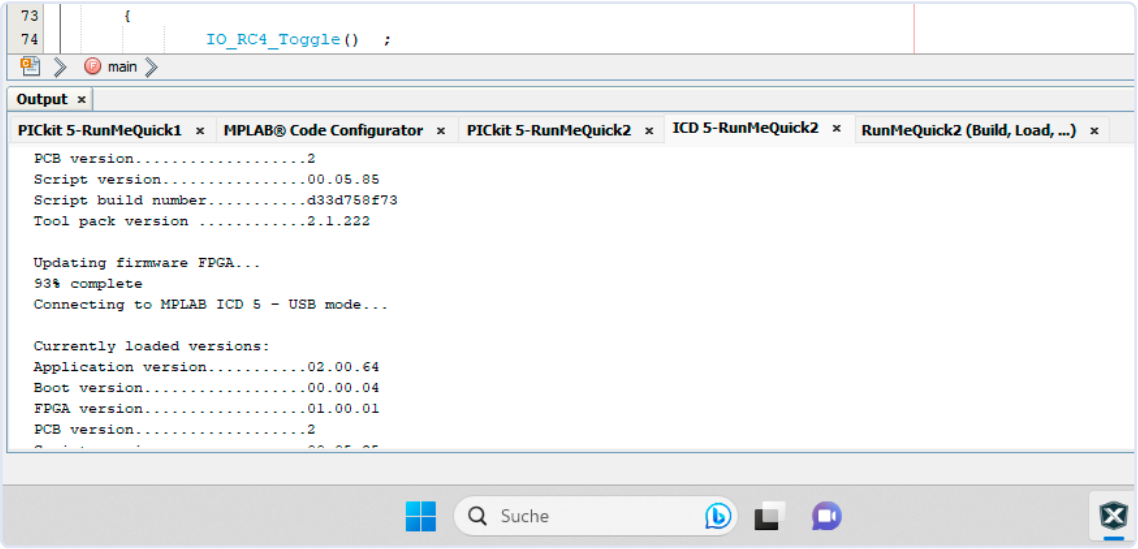
Stroom en spanning	Resolutie	Volle-schaal
stroom	29 µA/stap	1,0 A
spanning	0,2087 mV/stap	6,8 V

Nu kunnen we *Tools Plug-in Downloads* aanklikken en *Microchip Plug-in Manager* kiezen in het venster dat verschijnt. Controleer of *MPLAB Data Visualizer* al voorkomt in de *Installed*-sectie. Dit is meestal het geval bij een 'frisse' installatie.
Logischerwijs moet je de target-hardware voeden uit de ingebouwde voedingsbron van de ICD 5. De connector die in de ICD 5 wordt gebruikt is van het RJ45-type, terwijl oudere adapters zoals de ICD 3 een RJ11-kabel hebben. Zoals te zien in **figuur 10** maakt de connector in principe goed contact, maar het is niet de meest robuuste of veilige connector.
Om tijd en moeite te sparen, kunnen we de eerder voor de PICkit gemaakte LED-voorbeelden gebruiken om de stroommeetfunctie van de ICD 5 te testen. Ontkoppel de PICkit en sluit de ICD5 aan – voor het gemak gebruik ik geen netwerkkabel samen met zijn TCP/IP-functies maar maak ik in plaats daarvan verbinding via een USB-C-kabel. Merk op dat tijdens de 'eerste' installatie van een ICD, MPLAB een firmware-update moet uitvoeren voor de FPGA – dit eenmalige proces neemt enige tijd in beslag.
Interessant is dat dit proces vaak vastloopt bij 93% en dan 'gewoon' doorgaat (**figuur 11**) – waarom MPLAB hier nooit meldt dat de update-status 100% bedraagt, is niet helemaal duidelijk.
Klik in de volgende stap op *Window Debugging Data Visualizer* om het welkomstscherm van *Data Visualizer* te starten. Klik vervolgens in de sectie *Power* op de knop *Play* om de data-acquisitie te starten. MPLAB reageert hierop met het venster van **figuur 12**, waarin wordt aangegeven dat er geen weergavevorm is gedefinieerd.
Klik daarom op de functie *Plot Raw*, die nu een grafiek weergeeft. Als je het programma uitvoert dat beide LED's afwisselend laat knipperen, zie je informatie over het stroomverbruik, zoals te zien in **figuur 13**.
Interessantere resultaten kunnen worden verkregen door *RunMeQuick1* te gebruiken – dit voorbeeld schakelt beide LED's tegelijk aan en uit (**figuur 14**)

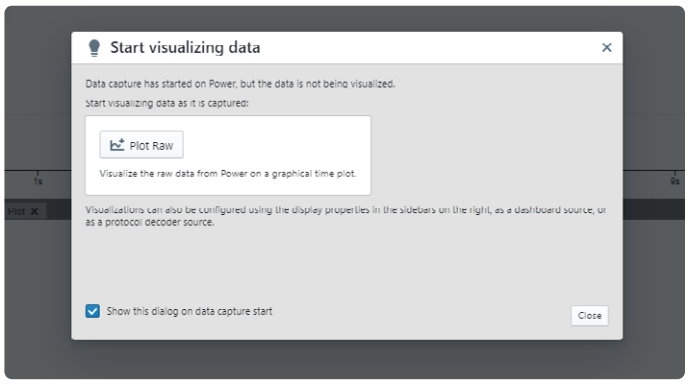
Samengevat

Microchip heeft een aantal goed uitgewerkte verbeteringen geïntroduceerd in de PICkit 5 en ICD 5, die ontwikkelaars zullen helpen bij zowel de debugging- als de 'serieproductie'-fase van de levenscyclus van een project. Zoekmachines voor elektronische onderdelen zoals *oemsecrets.com* zijn in staat om de beste realtime prijzen en voorraadniveaus van componenten van verschillende distributeurs te identificeren. De MPLAB PICkit 5 In-Circuit Debugger/Programmer wordt verkocht voor € 86, terwijl de MPLAB ICD 5 In-Circuit Debugger/Programmer verkrijgbaar is voor € 360 – helemaal niet te duur voor wat wordt geboden. Gebruikers van de PICkit 4 die zich ergeren aan de 'oude' interface willen misschien upgraden naar de nieuwe variant om het aantal kabels te beperken. De stroom-analysefunctie is ook erg waardevol en kan mogelijk aanzienlijke kosten besparen in vergelijking met een SMU- of GPIB-kaart.

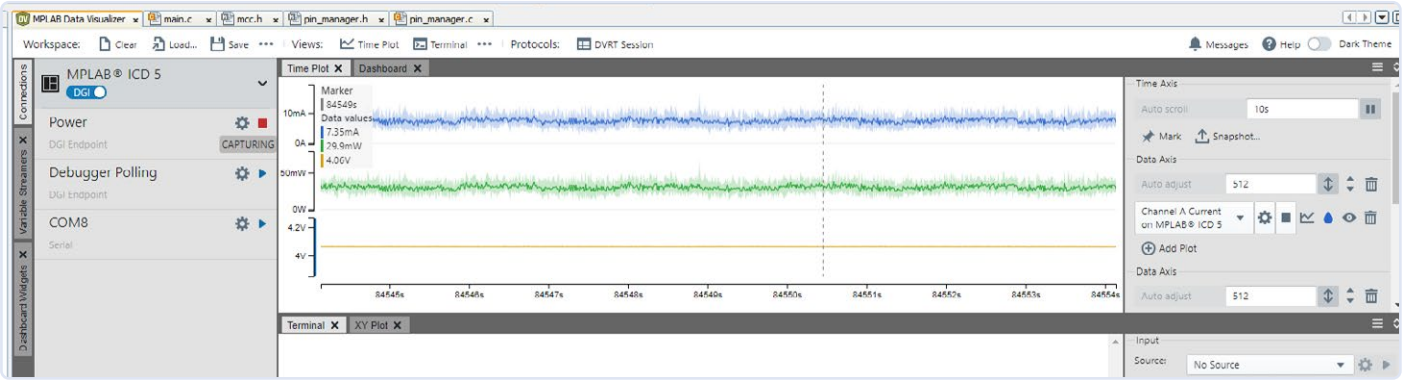
230571-03 (vertaling: Willem den Hollander)



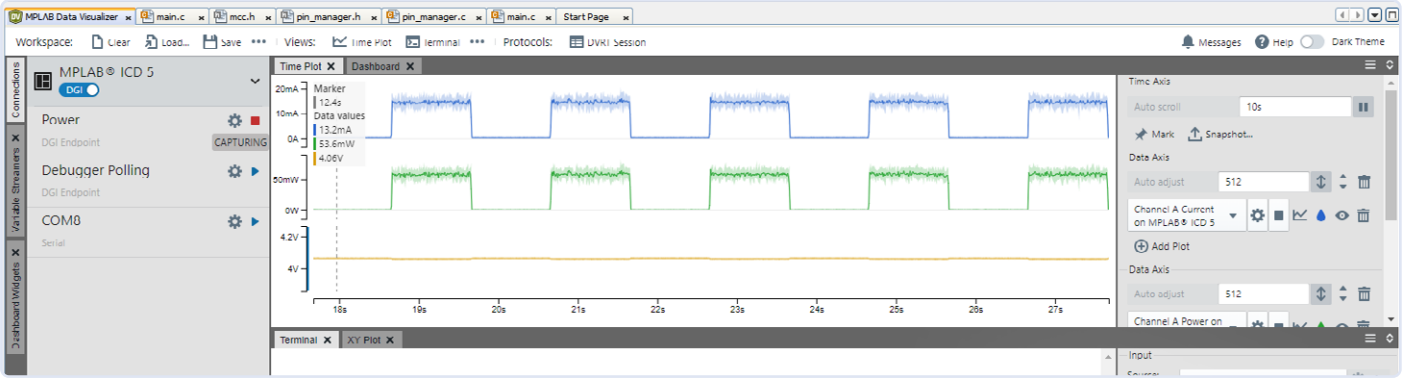
Figuur 11. 93% betekent hier dat de taak helemaal voltooid is!



Figuur 12. MPLAB vraagt hoe de opgenomen data moet worden weergegeven.



Figuur 13. Hier is steeds een LED ingeschakeld.



Figuur 14. Dit voorbeeld toont duidelijk de veranderingen in het stroomverbruik.

Vraag vandaag nog uw 15% kortingscode aan voor deze tools!
Vul uw gegevens in en selecteer voor welk product u een kortingsbon van 15% wilt.
U ontvangt dan een unieke couponcode die u kunt inwisselen bij MicrochipDirect.

https://page.microchip.com/pic5_icd5

WEBLINKS

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

Snelle prototypen van flexibele, rekbare elektronica

hoe de Voltera NOVA innovatie bij wearables versnelt

Stuart Cording (voor Voltera)

Op het gebied van printplaten (PCB's) heb je waarschijnlijk de meeste ervaring met die exemplaren met een groen FR4-substraat. Deze met koper beklede industrieklassieker wordt in het gewenste ontwerp omgetoverd door het overtollige koper te verwijderen. Maar, net als in de wereld van 3D-printen, zijn er mensen die werken aan systemen die printen printen. Zo kunnen onderzoekers het stugge FR4 vervangen door een flexibel en rekbaar substraat.

Figuur 1. De Voltera NOVA is een serieus stuk gereedschap, weegt 35 kg en is groot genoeg voor substraten tot A4-formaat.

Elektronica heeft zich in bijna elk aspect van ons leven een plaatsje verworven. Het is zelfs moeilijk om iets te vinden waar niet op de een of andere manier elektronica in voorkomt. En terwijl de traditionele materialen en processen voor de productie van schakelingen geoptimaliseerd zijn voor de eisen die daaraan gesteld worden, vinden onderzoekers op het gebied van medische elektronica deze vaak niet ideaal, vooral bij het bouwen van systemen die gedragen moeten worden. Menselijke en dierlijke lichamen zijn nooit helzelfde, de huid rekt uit wanneer deze in beweging is, en dat moet worden opgevangen door wearable elektronica. Flexibele PCB's bestaan al lang, met FR4-printen die aan elkaar zijn gekoppeld via polymide met kopersporen (ook bekend als Kapton). Maar hoewel dat de nodige flexibiliteit geeft, is het materiaal niet rekbaar.

Flexibele elektronica is mogelijk; het is alleen een uitdaging om het te fabriceren en bovendien het is voor de meeste prototyping-teams buiten bereik. Thermoplastisch polyurethaan (TPU) is bijvoorbeeld zowel flexibel als rekbaar en geleiders kunnen worden aangebracht met behulp van een metaal-depositieproces dat bekend staat als sputteren. In een vacuüm wordt het oppervlak van het materiaal gebombardeerd met ionen in gasvormige toestand die door een hoogspanning worden versneld. Bij aankomst vormen ze een hechte verbinding met het doelmateriaal. Deze methode wordt vaak gebruikt om aluminium of legeringen zoals wolfraam-titanium of aluminium-koper aan te brengen. Anders moet men zijn toevlucht nemen tot zeefdrukken, wat je waarschijnlijk voor het laatst op school hebt geprobeerd. Net als bij het bedrukken van posters of t-shirts wordt geleidende inkt op het substraat gedrukt via een sjabloon dat op een voorgespannen stalen of nylon gaas is aangebracht, waarna de inkt wordt verhit om uit te harden.

Additief vervaardigen van schakelingen

Dat maakt het prototypingproces ofwel traag en duur, ofwel traag en knoeierig. Daar komt nu echter verandering in dankzij de ontwikkeling van print-printers, die de ontwikkeling van kunststof-3D-printers dunnetjes over doen. Met Direct Ink Writing (DIW) gebruiken deze machines een additieve in plaats van een subtractieve aanpak om geleidend materiaal aan te brengen waar het nodig is.

Er zijn twee soorten rapid prototyping-printmethoden op de markt. De eerste maakt gebruik van drukverplaatsing, vergelijkbaar met een medische spuit. De inkt wordt in een dispenser gebracht terwijl er een plastic of rubberen plunjerkop tegenaan gedrukt. Als we de complexiteit van de vloeistofdynamica van geleidende inkten buiten beschouwing laten, is deze methode relatief betrouwbaar. Een specifieke verplaatsing van de plunjer levert reproduceerbaar steeds dezelfde hoeveelheid inkt door de spuitmond. Verstopping kan een probleem zijn, maar dat is een uitdaging voor elke dispenser die werkt met thixotrope materialen [1] (vloeistoffen waarvan de viscositeit bij schuifspanning verandert). Bovendien kan bij zelfgevulde dispensers ingesloten lucht de stroomsnelheid veranderen. Ook de opslag tussen gebruiksmomenten kan problemen opleveren. De inkt moet misschien gekoeld of ingevroren worden, hoewel sommige inkten bij kamertemperatuur kunnen worden bewaard.

De andere benadering is het thermisch inkjet-procédé, waarbij het gewenste patroon met geleidende inkt op het doelsubstraat worden gedrukt. Deze technologie kan kleine details drukken als hij goed is afgeregeld, en kan worden gebruikt met zowel stugge als flexibele substraten. Voor dit proces geschikte inkten hebben echter een relatief lage viscositeit, waardoor er minder opties beschikbaar zijn. Er zijn ook andere uitdagingen. De lage viscositeit van de inkt kan op sommige soorten substraat leiden tot parelen of uitlopen, wat resulteert in slechte hechting tenzij er speciale coatings worden aangebracht. En omdat een groot bestanddeel van de inkt oplosbaar is, laten uitgeharde gedrukte onderdelen vaak weinig geleidend materiaal achter. Problemen met soldeerbaarheid en een hogere spoorweerstand dan gewenst kunnen het gevolg zijn. Multipass printen kan dit tegengaan, maar dat kan weer invloed hebben op de minimale detailgrootte ten gevolge van uitlijningsfouten. Verstopping van spuitmondjes is een andere irritant probleem. Inkten destabiliseren als ze verkeerd worden opgeslagen, waardoor ze verstoppingen veroorzaken door de klontvorming. En zelfs als de aanbevelingen voor opslag worden opgevolgd, zal de warmte van het thermische inkjetproces een beetje inkt al in de spuitmondjes doen uitharden.

NOVA – een modulair dispenserplatform

Voltera, de Canadese scale-up die ongeveer zeven jaar geleden de V-One [2] op de markt bracht, heeft de uitdagingen van snelle prototypes van flexibele schakelingen aangenomen. Die V-One was vooral gericht op harde substraten, hoewel gebruikers ook flexibele schakelinge maakten. Met de NOVA [3], hun nieuwste printer die eind vorig jaar werd gelanceerd, hebben ze zich volledig toegelegd op de ondersteuning van flexibele, rekbare elektronica (**figuur 1**).

Gebruikmakend van de kennis van drukverplaatsingsprinten, zijn de injectiespuit-achtige dispensers gebleven. De hardware is echter aanzienlijk verbeterd, met druk-terugkoppeling die in de printkop is geïntegreerd. Er is ook een verwarmingselement van 12 W dat de temperatuur van de inkt constant houdt, wat zorgt voor een consistenter doseerresultaat tijdens het aanbrengen. Het is ongelofelijk dat zelfs variaties in de airconditioning tussen kamers kunnen leiden tot verschillen in de manier waarop de inkt wordt aangebracht. Rekening houdend met de grote verscheidenheid aan substraten en inkten die ze proberen te ondersteunen, kunnen gebruikers snel materialen uitproberen met viscositeiten van 1000 tot 1000.000 cP (centipoise). Terwijl op zilver gebaseerde inkten zoals de Conductor 3 [4] gemakkelijk verkrijgbaar zijn en geschikt zijn voor zowel stugge als flexibele toepassingen, kun je ook een dispenser vullen met dezelfde geleidende inkten die worden gebruikt voor zeefdruk-elektronica om aan je eigen behoeften te voldoen.

Figuur 2. De Smart Dispenser heeft een geïntegreerd verwarmingselement en AI-gestuurde flowkalibratie. De Smart Probe heeft een robijnpunt om het oppervlak van een substraat nauwkeurig in kaart te brengen.

De NOVA weegt 35 kg, wat betekent dat hij op een vaste plek moet worden opgesteld. En met 675×605×345 mm zal hij het grootste deel van een tafel in beslag nemen. Aan de voorkant biedt een lade ruimte om materiaal en gereedschap op te bergen. Binnenin zorgt een schuimrubberen bekleding ervoor dat de printkop en de tastsonde veilig zijn opgeborgen, samen met de andere tools die je tijdens het gebruik bij de hand moet hebben.

Hoewel het apparaat een Ethernet-aansluiting heeft, raadt de gebruikershandleiding aan om de meegeleverde WiFi-dongle aan te sluiten en deze te gebruiken om toegang te krijgen tot de printer. In plaats van software die je op je PC moet installeren, is dit apparaat browser-gebaseerd. Dat betekent dat je, ongeacht besturingssysteem en merk van je computer, geen problemen zult hebben om de printer te bedienen. Bovendien heeft in een labomgeving iedereen die dat wil en mag toegang tot het apparaat. Maar als je geen liefhebber van WiFi bent, kun je altijd nog een Ethernet-kabel gebruiken.

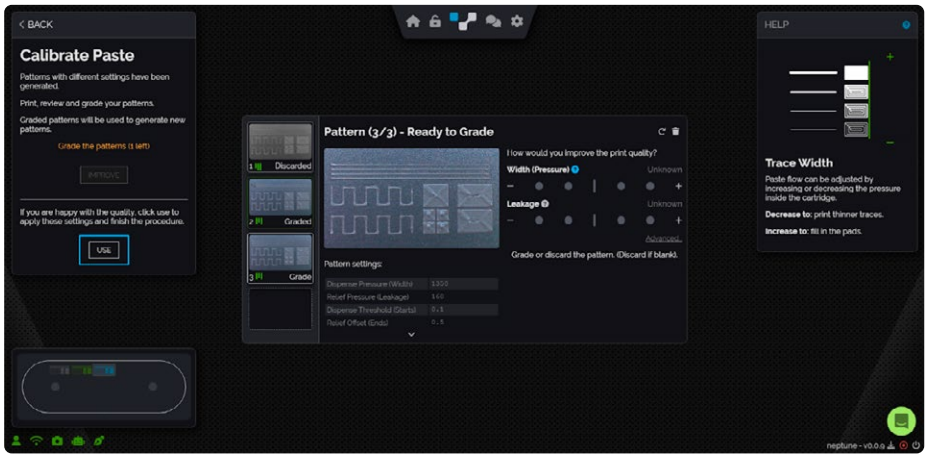
Een flexibel substraat op zijn plaats houden

Je flexibele substraat wordt op zijn plaats gehouden door het poreuze titanium printbed met een geïntegreerde vacuümpomp, groot genoeg voor alles tot maximaal A4-formaat. Dit voorkomt dat het materi-

aal omkrult tijdens het printen en biedt een betere opspanoplossing dan vastklemmen. De modulehouder is bevestigd aan een XYZ-portaal dat plaats biedt aan twee tools tegelijk. Dit zijn de Smart Dispenser en de Smart Probe (**figuur 2**). Deze laatste bezit een sonde met robijnpunt die het substraatoppervlak nauwkeurig in kaart brengt. De tools zijn eenvoudig aan te brengen en los te koppelen dankzij de spelingsvrije koppeling en vergrendeling. Geïntegreerde LED's tonen de gebruiker de status van het tool.
De Smart Dispenser heeft een druksensor die wordt gebruikt voor gesloten lus-terugkoppeling om tijdens het gebruik een consistente inktstroom te leveren. De dispensers zijn standaardtypen van 5 cc die gevuld kunnen worden met 2,5 ml inkt. Extra exemplaren zijn verkrijgbaar bij Voltera en zijn partners. Er kunnen sporen tot 0,1 mm worden geprint, terwijl SMD-pads met een raster van 0,4 mm ondersteund worden met de juiste combinatie van spuitmond en inkt. Er zijn spuitmondjes verkrijgbaar van 100 µm, 150 µm en 225 µm. Dankzij het gebruik van lekvrije Luer-lock dispensers kan echter elke standaard spuitmond worden gebruikt, zodat de optimale combinatie kan worden gevonden om met de gekozen inkt de gewenste spoorbreedte te verkrijgen.
Verreweg het grootste voordeel van de NOVA is de flexibiliteit bij het testen van verschillende inkten met verschillende substraten. Afhankelijk van de samenstelling kan de inkt alleen geschikt zijn voor harde substraten. Andere kunnen gebruikt worden op flexibele maar niet rekbare materialen. Polyimide (flexibel) en TPU (rekbaar) zijn populaire materialen, maar je moet er ook voor zorgen dat de inkt het oppervlak bevochtigt. Er wordt ook geëxperimenteerd met papier, dat poreus is. Als de inkt wordt opgezogen, bestaat het risico dat er zich geen geleidende sporen vormen. In dergelijke gevallen kan gecoat papier uitkomst bieden.

Camera-ondersteunde kalibratie

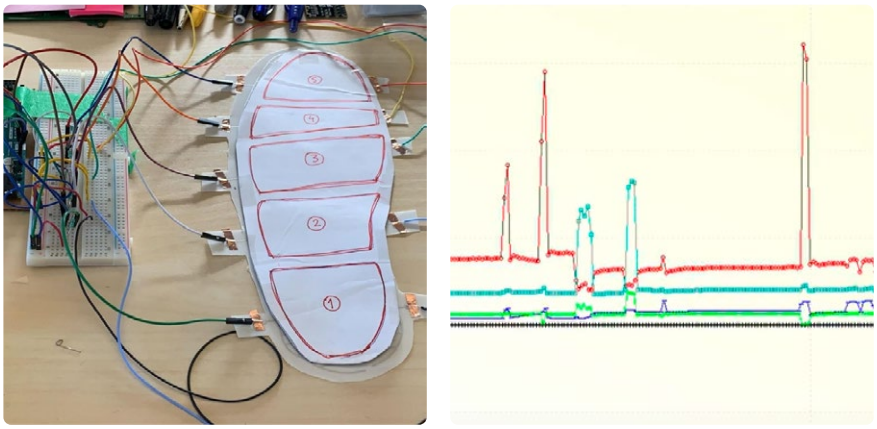
Voordat het printen begint, wordt een AI-gestuurd kalibratieproces uitgevoerd (**figuur 3**). Het gewenste patroon wordt daarbij geprint op een speciale, uitneembare kalibratieplaat (in plaats van op het doelsubstraat) die in het apparaat is geïntegreerd. Hierdoor hoeft het doelsubstraat, een alternatief kalibratiedoel, niet gereinigd te worden alvorens het printen begint. NOVA bevat ook een acht-megapixel-camera die foto's maakt van de kalibratieprint. Na elke test wordt die getoond in de gebruikersinterface, waardoor het veel eenvoudiger is om te bepalen of de dosering past bij wat je nodig hebt.



Figuur 3. De software voor de NOVA is browsergebaseerd. Hier zien we het AI-ondersteunde kalibratieproces in actie.

Uitharden en solderen

Na het printen is de volgende stap het uitharden en hiervoor is een aparte oven nodig. Zo is Conductor 3-inkt voor flexibele printen samengesteld voor uitharding bij een profiel van 90 °C gedurende vijf minuten, gevolgd door 120 °C gedurende 20 minuten, iets meer dan de helft van de tijd die nodig was bij de vorige generatie inkten. Je moet begrijpen dat het uithardingsproces dient om de oplosmiddelen van de inkt te verdampen, waarna de resterende bindmiddel-polymeren overblijven om de geleidende partikels in de inkt op hun plaats te houden. Hierdoor kan de dikte van de printsporen tijdens het uitharden afnemen. Sommige toepassingen vereisen alleen dat geleidende sporen worden aangebracht op een flexibel of rekbaar substraat. Maar bij andere toepassingen moeten er misschien ook nog componenten worden geplaatst. Afhankelijk van de gebruikte inkt kan het nodig zijn om de soldeereilandjes te beitsen voor het solderen. Bovendien moet de soldeertemperatuur vaak verlaagd worden om zowel de geleidende sporen als het substraat te beschermen. De Conductor 3-inkt hoeft bijvoorbeeld niet gebeitst te worden. Er is echter een tin-bismut-zilver (SnBiAg) soldeer of soldeerpasta nodig, in combinatie met een temperatuur van slechts 180 °C van soldeerboutpunt of een reflow-oven.
Andere methoden om flexibele of rekbare materialen met je elektronische schakeling te verbinden zijn vastklemmen, geleidende



Figuur 4. Deze sensor voor de binnenzool van de schoen is gemaakt met behulp van een TPU-substraat en rekbare zilverinkt. Samen met een Arduino Mega kan de druk van verschillende delen van de voet worden gemeten.

lijm of het maken van een contactstrip voor een ZIF-connector, waarvoor eventueel weer een versteviging nodig is.

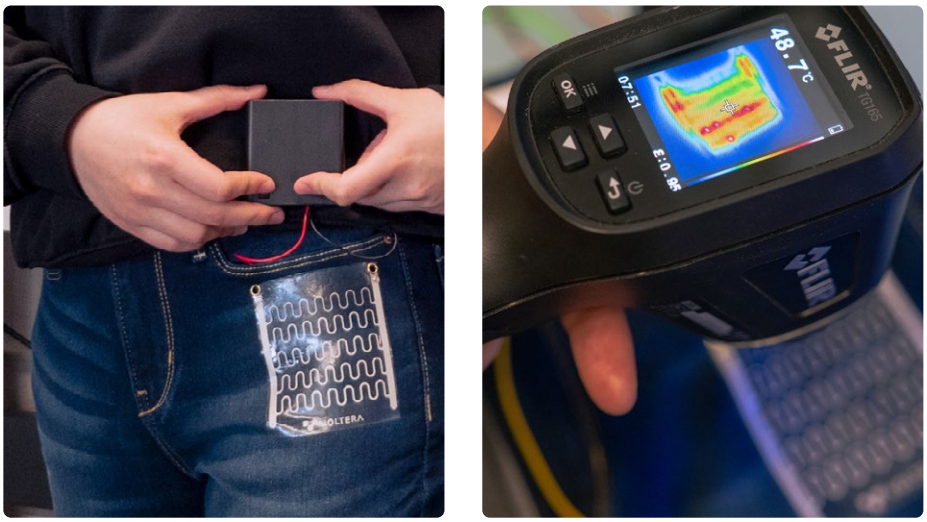
Eerste pogingen met rekbare printen

Het Voltera-team heeft hard gewerkt om de optimale combinaties van substraat en inkt voor diverse soorten wearables te onderzoeken. Een daarvan was een druksensor in de binnenzool van schoenen om drukpunten te bepalen en zo houdings- en loopproblemen te onderkennen (**figuur 4**). Het prototype maakt gebruik van Celanese Intexar TPU-film en Intexar PE874 rekbare geleidende inkt op zilverbasis van dezelfde leverancier. De geprinte sensor en een laag koolstoffolie werden aangesloten op een Arduino Mega, waardoor de gemeten drukken in grafiek konden worden gebracht.

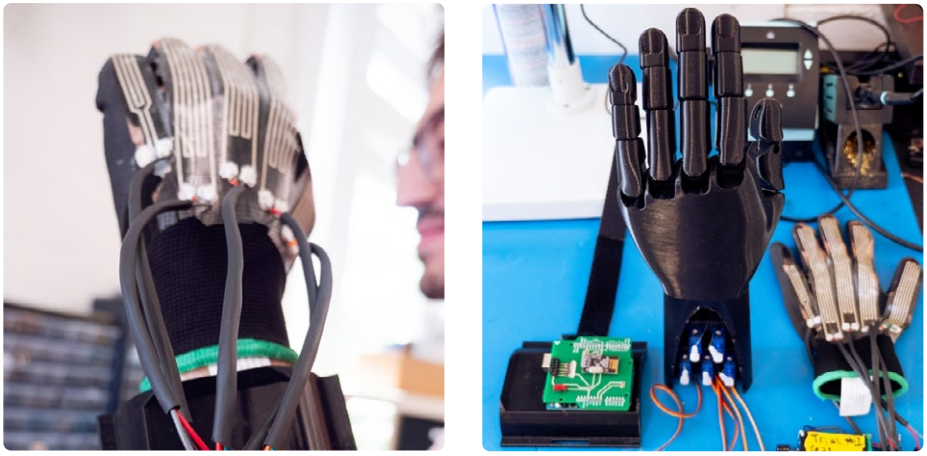
Een ander project gebruikte dezelfde materialen om een verwarmingselement te maken dat op kleding kan worden aangebracht (**figuur 5**). Het verwarmingselement wordt op de stof gelamineerd met behulp van een T-shirtpers die gewoonlijk wordt gebruikt voor het opdrukken van foto's, terwijl een mechanische klemverbinding de stroomvoorziening mogelijk maakt. Rekbare substraten kunnen ook worden bedrukt met geleidende inkt om rekstrookjes te maken. Dit werd met succes toegepast in een besturingshandschoen voor een robothand (**figuur 6**). Dikkere printsporen bleken consistentere signalen op te leveren, terwijl MG Chemicals 9400 geleidende lijm het mogelijk maakte om bedrading op de sensoren aan te sluiten.

Met additieve PCB-druktechnologie kunnen onderzoeks- en engineeringteams de ontwikkelingstijd verkorten en hun ideeën veel sneller itereren. Geleidende inkten kunnen zelfs worden gebruikt om fouten in een PCB-ontwerp te herstellen door gewoon ontbrekende of extra sporen te printen en vervolgens uit te harden. Draagbare elektronica is lange tijd een uitdaging geweest. Dit komt omdat de echt rekbare elektronica voor gebruik dicht op de huid alleen geproduceerd kon worden met behulp van dure metaalsputtertechnieken of geknoei met zeefdrukken. Dankzij de Voltera NOVA kunnen onderzoekers nu innoveren en tegen een fractie van de kosten zelf prototypen maken in aantallen die groot genoeg zijn voor zinvolle tests.

230633-03



Figuur 5. Een flexibele kledingverwarmer zoals deze kan worden gebruikt om de dorbloeding te bevorderen door bloedvaten te verwijden.



Figuur 6. Door gebruik te maken van de veranderende weerstand van geleidende inkt op een rekbaar substraat kan via rekstrookjes in de vingers van deze handschoen een robothand worden bestuurd.

WEBLINKS

[1] Thixotrope vloeistoffen: https://ptm-mechatronics.com/en/topics/wiki/thixotropic-liquids
[2] V-One – desktopprinter voor PCB's: https://voltera.io/v-one
[3] NOVA – een modulair dispenserplatform: https://voltera.io/nova
[4] Conductor 3-inkt: https://store.voltera.io/products/conductor-3-ink-cartridge-2ml
[5] Elektor Expert Paper: The buyer's guide to PCB printers: https://elektormagazine.com/elektor-pcb-printer

Galvanische isolatie

fototransistor-optocouplers succesvol gebruiken

Eleazar Falco (Würth Elektronik eiSos)

Optocouplers geven elektrische signalen optisch door via een isolatiebarrière zodat twee delen van een schakeling galvanisch van elkaar geïsoleerd kunnen worden. Welke aspecten spelen een belangrijke rol bij het gebruik ervan en wat zijn hun beperkingen?

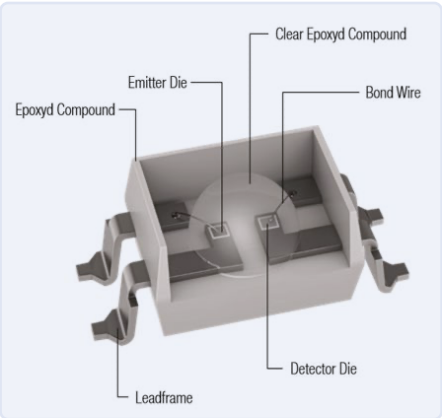
Een optocoupler is een component die een elektrisch signaal kan overbrengen door optische koppeling van twee galvanisch van elkaar geïsoleerde (deel)schakelingen. In tegenstelling tot transformatoren of condensatoren, die alleen AC-signalen over de isolatiebarrière kunnen sturen, sturen optocouplers zowel DC- als AC-signalen door. Dit maakt ze erg populair voor talloze toepassingen zoals geïsoleerde voedingen en communicatie-interfaces.

Om een werkende, robuuste en betrouwbare toepassing met optocouplers te ontwerpen, is het essentieel om niet alleen de belangrijkste parameters en parasitaire elementen van de component te begrijpen, maar ook de variaties en afhankelijkheid van andere factoren zoals temperatuur of werkpunt. In deze context zijn de belangrijkste factoren de *current transfer ratio* (CTR) en de parasitaire uitgangscapaciteit van de optocoupler, die het werkfrequentiebereik en het schakelvermogen beperken. Dit artikel behandelt de basisprincipes van de werking van de WL-OCPT-familie van optocouplers [1] met fototransistor-uitgang van Würth Elektronik, inclusief de karakterisering van de parameters voor een gegeven bedrijfsconditie en belangrijke ontwerpoverwegingen.

Opbouw en werking

Een optocoupler met fototransistor bestaat uit een infrarood-lichtzender (IR-LED, galliumarsenide (GaAs)) en een lichtdetector (fototransistor), beide optisch gekoppeld en meestal ingekapseld in een 4-pins behuizing. Deze component wordt geleverd in verschillende bouwgroottes en soldeervarianten om te voldoen aan de verschillende footprint- en isolatievereisten van de beoogde toepassingen. De WL-OCPT-serie is gebaseerd op een coplanaire dual-cast structuur met een metalen frame van een koperlegering en een heldere epoxy dome die als optisch medium tussen de IR-LED en de fototransistor dienst doet (**figuur 1**). Deze opbouw zorgt voor een mechanisch robuuste isolatiebarrière bij zeer hoge spanningsniveaus (bijvoorbeeld 5 kV) met behoud van een compact formaat.

Het werkingsprincipe van de optocoupler: in de zender wordt stroom in omgezet omdat de IR-LED infrarode straling (dat wil zeggen fotonen) uitzendt met een intensiteit die evenredig is met de stroom die er doorheen loopt. Deze fotonen passeren het optische medium en bereiken na reflectie tegen het binnenoppervlak van de dome het lichtgevoelige basis/collector-junctie van de fototransistor. Hier wordt de lichtenergie in stroom omgezet: de valentie-elektronen van de fototransistor 'absorberen' de fotonenenergie en 'springen' naar de geleidingsband, waardoor een stroom wordt opgewekt tussen de collector en de emitter – vergelijkbaar met een conventionele bipolaire NPN-transistor. De verhouding tussen de collectorstroom van de fototransistor (I_C) en de stroom van de IR-LED (I_F) is de belangrijkste parameter van de optocoupler: de DC-overdrachtsverhouding (current transfer ratio, CTR). Het elektrische symbool van een optocoupler met fototransistor is getekend in **figuur 2**.

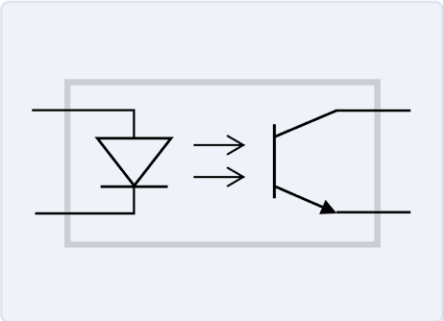


Figuur 1. Typische opbouw van een optocoupler uit de WL-OCPT-familie.

Direct Current Transfer Ratio (CTR)

CTR is de stroomversterkingsparameter van de optocoupler, uitgedrukt als de verhouding van collectorstroom (I_C) tot LED-stroom (I_F) in **vergelijking 1**:

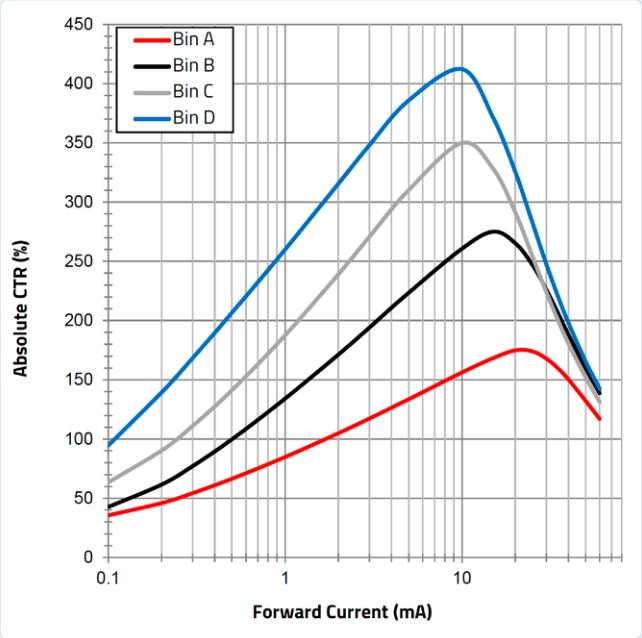
$$CTR = \frac{I_C}{I_F}$$



Figuur 2. Het elektrische schemasymbool van een fototransistor-optocoupler.

Tabel 1. CTR-binning: WL-OCPT-serie 816 en 817
Testcondities I_F = 5 mA, V_{CE} = 5 V, T = 25 °C

Bin	Min.	Max.	Eenheid
geen	50	600	%
A	80	160	%
B	130	260	%
C	200	400	%
D	300	600	%



Figuur 3. Absolute CTR als functie van I_F (bij V_{CE} = 5 V, T = 25 °C; WL-OCPT 817).

Merk op dat vergelijking 1 geldig is wanneer de fototransistor is ingesteld in zijn actieve werkgebied. Naar analogie komt de CTR overeen met de statische h_{FE} of β-parameter (bèta) van een bipolaire transistor, terwijl de LED-stroom zou overeenkomen met diens basisstroom. In functionele termen kan de optocoupler daarom worden gezien als een bipolaire NPN-transistor met geïsoleerde basis. Ook moet worden opgemerkt dat de CTR meestal wordt uitgedrukt als een percentage (%) (**vergelijking 2**):

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

Een van de grootste uitdagingen bij het ontwerpen van optocouplers zijn de door verschillende factoren veroorzaakte grote toleranties en variaties in de CTR-waarde.

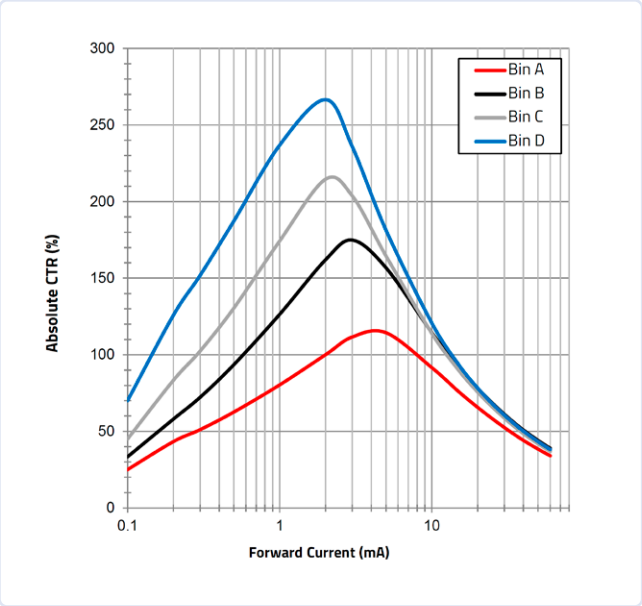
CTR-fabricagetolerantie en 'binning'

De beperkingen van halfgeleider-productieprocessen maken het moeilijk om componenten te produceren met identieke kenmerken en parameterwaarden. IR-LED's worden gemaakt op GaAs-substraatwafers, waardoor het lastig is een volledig uniforme halfgeleider-dotering en laagdikte te realiseren. Dit resulteert in verschillen in het rendement van de stroom-naar-licht omzettingt voor elke LED op de wafer (dat wil zeggen dat de lichtenergie die door elke LED wordt uitgestraald bij een bepaald stroomniveau verschillend is). Gelijksoortige beperkingen gelden voor de fototransistor, wat resulteert in verschillende lichtgevoeligheid (dat wil zeggen dat ze bij een bepaalde lichtenergie verschillende collectorstromen produceren). Deze twee factoren hebben een directe invloed op de CTR-tolerantie bij de fabricage, maar er is meer. Variaties in de transmissie- en reflectieparameters van de heldere epoxy-dome die de LED en fototransistor optisch koppelt, dragen bijvoorbeeld ook bij aan de toename van de CTR-fabricagetolerantie van de optocoupler.
Omdat een te grote tolerantie onpraktisch is voor de meeste ontwerpen, wordt de CTR van elke optocoupler tijdens de productie gemeten bij een gespecificeerd DC-werkpunt en wordt de component geclassificeerd op basis van de gemeten waarde als onderdeel van een 'binning'-proces. Elke 'bin' garandeert een minimale en maximale CTR-waarde onder de gespecificeerde testomstandigheden en wordt aangeduid met een extra letter, zoals in **tabel 1** voor de WL-OCPT 816/817-serie. Hoewel dit het initiële tolerantiebereik verkleint waarmee in het ontwerp rekening moet worden gehouden, is de CTR ook afhankelijk van de bedrijfsomstandigheden zoals DC-instelspanning en de temperatuur, en met deze factoren moet ook rekening worden gehouden.

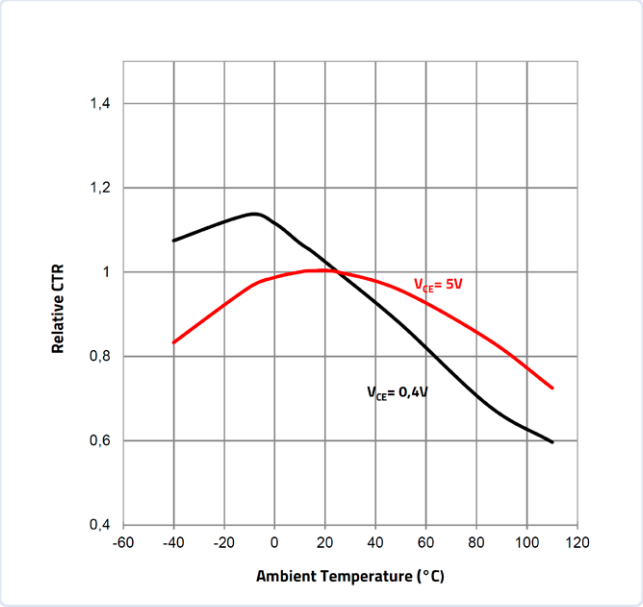
Door de LED-stroom veroorzaakte variatie van de CTR

Het CTR-bereik binnen een bin is alleen geldig voor een bepaalde LED-stroom (I_F) en collector/emitter-spanning (V_{CE}). Voor de WL-OCPT-serie zijn deze respectievelijk 5 mA en 5 V. Voor een andere LED-stroom zou het resulterende CTR-bereik anders zijn, zoals te zien is in **figuur 3**: hier is de absolute CTR uitgezet als functie van de LED-stroom van een exemplaar uit elke bin (voor V_{CE} = 5 V). Hieruit blijkt hoe de CTR tot een bepaald punt toeneemt met de LED-stroom, waarboven het gedrag omkeert, dat wil zeggen dat een verdere toename van de LED-stroom een afname van de CTR veroorzaakt. Dit komt door het niet-lineaire rendement van de stroom/licht-omzetting van de LED in combinatie met de variatie in fototransistor-versterking. Voor I_F = 5 mA ligt de CTR van elke optocoupler binnen het bereik van de betreffende bin.
Wanneer de fototransistor in het verzadigingsgebied komt, veranderen ook de CTR-waarde en de karakteristiek, zoals getoond in **figuur 4** voor V_{CE} = 0,4 V: de CTR is lager en de karakteristiek piekt bij een lagere LED-stroom.
Merk op dat de karakteristieken in figuur 3 en 4 overeenkomen met slechts één monster uit elke bin. Karakteristieken voor de relatieve CTR zijn ook te vinden in de datasheet van de WL-OCPT-serie, waar de CTR genormaliseerd is naar de waarde gemeten voor I_F = 5 mA. Voor een LED-stroom van minder dan 10 mA en met de fototransistor ingesteld in het actieve gebied (V_{CE} = 5 V), liggen alle genormaliseerde karakteristieken zeer dicht bij elkaar, ongeacht de bin [2]. Aangezien de relatieve CTR-karakteristiek van een bin in dit bereik praktisch niet verandert met de absolute CTR-waarde, kan de absolute CTR van elke component binnen de bin geschat worden met **vergelijking 3**:

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



Figuur 4. Absolute CTR als functie van I_F (bij V_{CE} = 0,4 V, T = 25 °C).



Figuur 5. CTR als functie van de temperatuur (bij I_F = 5 mA).

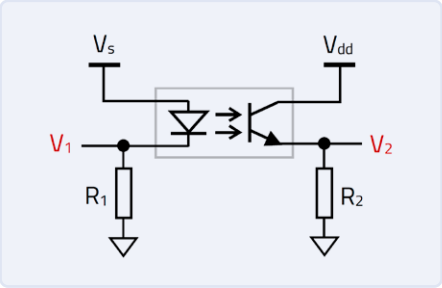
Opgemerkt moet worden dat boven 10 mA de relatieve karakteristieken een grotere afwijking vertonen van de absolute CTR-waarde, dus vergelijking 3 is in dat bereik minder nauwkeurig. Wanneer de fototransistor in verzadiging is, zijn de karakteristieken van de curve tot op zekere hoogte omgekeerd en is vergelijking 3 alleen nauwkeurig boven ongeveer 5 mA [2].

Temperatuurafhankelijke variatie van de CTR

De bedrijfstemperatuur van de optocoupler beïnvloedt zowel de efficiëntie van de LED-emissie als de lichtstroomversterking van de fototransistor, en beïnvloedt in dit opzicht de CTR van de optocoupler op een niet-lineaire manier – de karakteristieken voor de relatieve CTR in **figuur 5** laten dit zien. Beide karakteristieken zijn geldig voor alle bins en voor een LED-stroom lager dan ongeveer 5 mA. Merk op dat hier rekening wordt gehouden met de temperatuur van de omgeving waar de optocoupler wordt gebruikt en waarmee de junctietemperatuur van de optocoupler recht evenredig is.

Meting van de CTR

Het meten van de CTR voor de specifieke DC-instellingen van de toepassing is eenvoudig als de stromen gemeten worden op basis van vergelijking 1. Dit geldt ook voor de aanbevolen opstelling in **figuur 6**, waar alleen spanningsmetingen worden uitgevoerd. Hier wordt een typische collectorconfiguratie gebruikt. Zowel de uitgangsweerstand R2 als de instelspanning V_{dd} worden ingesteld zoals in de uiteindelijke schakeling waarin de optocoupler wordt gebruikt, en voor de LED-weerstand R1 wordt dezelfde waarde gekozen als voor R2. Vervolgens wordt de DC-ingangsspanning (V_s) verhoogd totdat de collector/emitter-spanning (V_{CE}) de doelwaarde bereikt. De CTR voor deze DC-instelling wordt gegeven door **vergelijking 4**:



Figuur 6. Aanbevolen opstelling voor CTR-meting.

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

Andere parameters in detail

Application note ANO007 [2] biedt nog veel meer gedetailleerde informatie over optocouplers, die buiten het bestek van dit artikel zou vallen. Dat betreft in het bijzonder:

- een voorbeeld voor het schatten van het CTR-bereik en de AC/kleinsignaal-CTR;
- een beschouwing van de frequentierespons en bandbreedte, met meetwaarden;
- schakeltijden en de variaties daarvan;
- de DC-instelspanning van de optocoupler;
- SPICE-modellering

230546-03

Over de auteur

Eleazar Falco heeft een diploma in Electrical Engineering van de Universiteit van Elche in Spanje. In 2014 trad hij in dienst bij Dyson in het Verenigd Koninkrijk, waar hij werkte aan de ontwikkeling van elektronica-hardware voor huishoudelijke apparaten, met de nadruk op offline voeding en motorbesturing. Sinds 2018 is hij Applications Engineer voor schakelende voedingen bij Würth Elektronik in Duitsland.

WEBLINKS

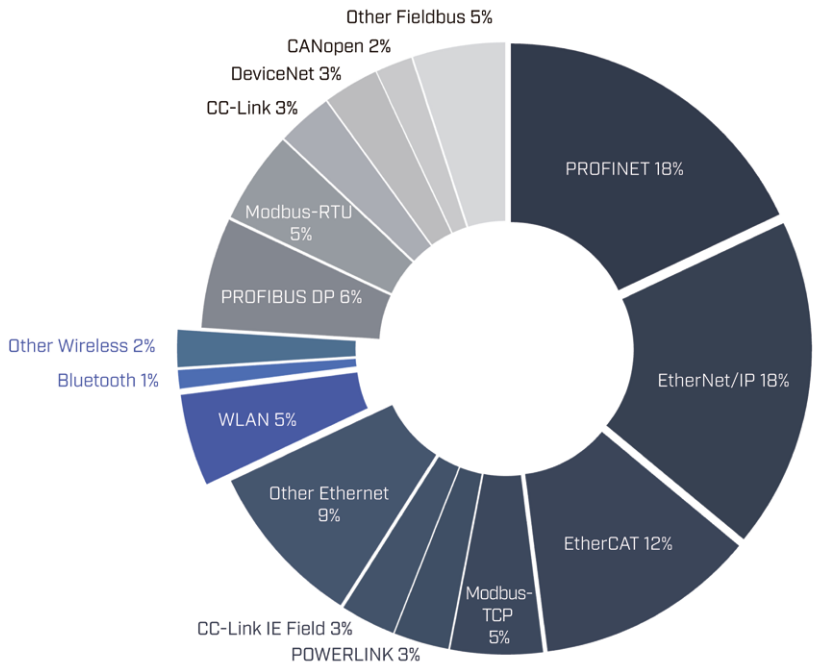
[1] WL-OCPT fototransistor-optocoupler van Würth Elektronik: https://tinyurl.com/weoptocouplers
[2] Falco, Eleazar: Understanding Phototransistor Optocouplers. Application Note ANO007 van Würth Elektronik: http://www.we-online.com/ANO007

De complexe of de Anybus-oplossing?

embedded industrieel ethernet in twee dagen in plaats van maanden

Een bijdrage van HMS Networks

Industriële netwerken spelen een steeds belangrijkere rol in de besturing van machines, fabrieken en magazijnen. Wat ooit begon met eenvoudige remote aansturing van I/O's is uitgegroeid tot schaalbare netwerken die zelfs de meest complexe besturing van complete fabrieken met duizenden nodes kunnen verzorgen. De meeste nodes zijn vaak kant-en-klare producten zoals drives, I/O-stations of sensoren. Maar wat te doen als u elektronica met een industrieel netwerk wilt verbinden?



Figuur 1. Het in 2023 uitgevoerde onderzoek door HMS Networks laat een totale groei van het aantal geïnstalleerde nodes zien van 7%.

Industriële netwerken

Het is belangrijk om te beseffen dat industriele netwerken een breed scala aan industriele protocollen omvatten. Zo zijn er veldbussen zoals Profibus, Modbus of CANopen, die vooral worden toegepast in omgevingen waar lange afstanden een rol spelen. Denk bijvoorbeeld aan grote brandstofopslagtanks waar sensoren en andere nodes honderden de meters uit elkaar kunnen zijn geplaatst.
Andere netwerken zijn op Ethernet gebaseerd, zoals Profinet, EtherNet/IP of EtherCAT (**figuur 1**). Ze bieden goede real-time eigenschappen, waarbij de nauwkeurigheid een grote rol speelt. De snelste protocollen halen cyclustijden van 50 µs, met een afwijking <1 µs. Daarmee kunt u bijvoorbeeld motoren nauwkeurig synchroon aansturen. Naast real-time aspecten worden binnen de industrie ook steeds vaker cloud-verbindingen gebruikt. Ook daar zijn verschillende protocollen voor beschikbaar. Op dit moment bestaat zo'n 25% van de markt uit veldbussen en 70% uit Ethernet-varianten. De overige 5% is draadloos. Protocollen zijn echter niet zo vrij te kiezen. Ze zijn vaak gekoppeld aan een specifieke produ-

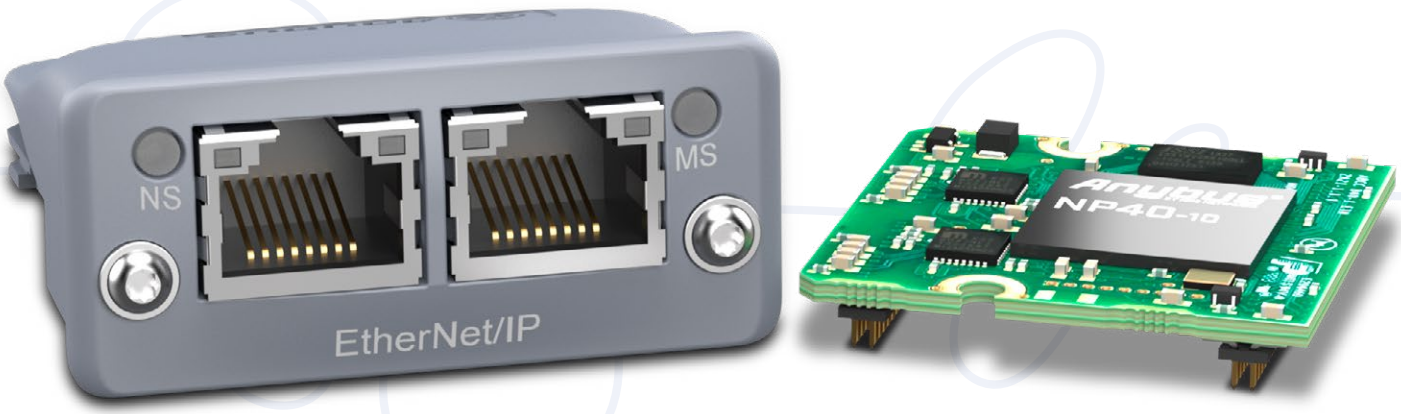
cent van PLC's. En die hebben weer een eigen typisch marktaandeel. In Europa zijn daarom protocollen als Profibus, Profinet of EtherCAT erg populair, terwijl in Noord-Amerika EtherNet/IP het meest gebruikt is.
Stel dat u een barcodescanner voor gebruik in de logistiek ontwikkelt. De systeemintegratoren die de scanner in hun systeem gaan toepassen bepalen welk netwerk ze gebruiken, vaak ook nog in overleg met de eindklant. De keuze van het protocol is afhankelijk van de klant. Daarom moet uw scanner meerdere protocollen ondersteunen.

Ontwerpen van industriële netwerk-interfaces

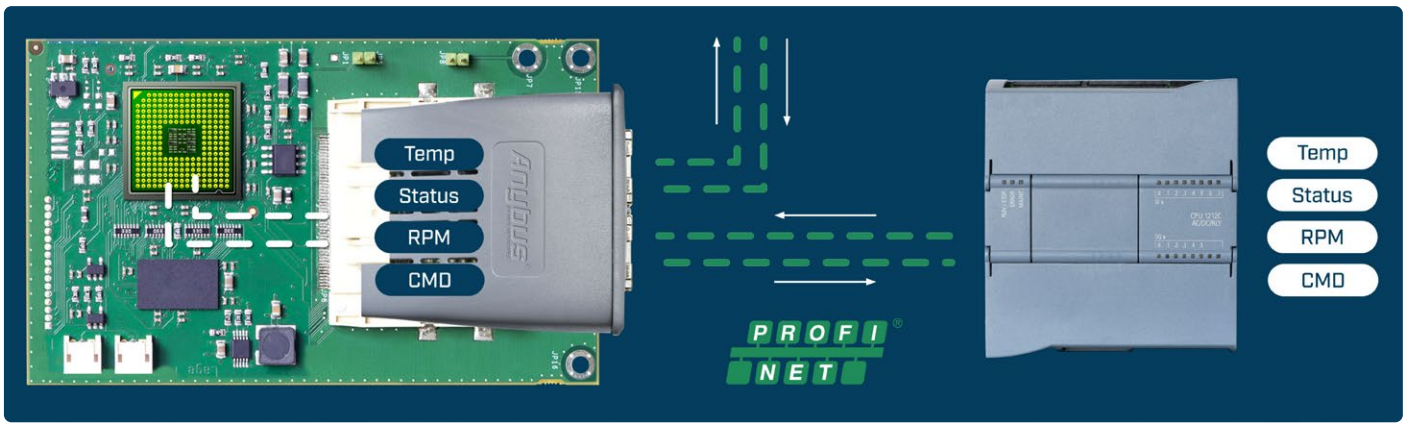
Wat komt er bij het ontwerpen van meerdere industriële netwerk interfaces kijken? Het is duidelijk dat er sprake is van verschillende hard- en software. Veldbussen maken sowieso allemaal gebruik van verschillende hardware. CAN-bus heeft een eigen fysieke driver (ISO 11898), Profibus (DP) gebruikt RS485 enzovoort. De Ethernet-varianten verschillen echter ook. De meesten zijn 100 Mb/sec, maar achter de RJ45 en de PHY ziet men de verschillen. Ze gebruiken verschillende ontworpen MAC's, buffers, soms real-time clocks (IEEE 1588), of een geheel eigen controller (EtherCAT). CC-link, veel gebruikt in Japan, is weer een gigabit-verbinding. Daarnaast maken sommige industrieën standaard gebruik van glasvezelverbindingen in plaats van het traditionele koper.
De softwarezijde is zelfs nog complexer. Voor ieder protocol zijn high-speed datastroom-processoren en -stacks op de markt beschikbaar. Maar dat zijn niet gewoon bibliotheken die u in uw embedded software meelinkt. Ze vragen om gedegen inhoudelijke kennis hoe een specifiek protocol werkt, en hoe onderdelen daarvan worden geïmplementeerd. Daarnaast heeft iedere stack een eigen driver die aan de target-hardware moet worden aangepast. Stacks zijn vaak van diverse leveranciers, elk met een eigen API zodat de applicatiesoftware op zijn beurt moet worden aangepast aan elk protocol. Alle toegepaste protocollen moeten gecertificeerd worden, zodat ze aan alle technische netwerkeisen voldoen. En protocollen worden natuurlijk steeds doorontwikkeld, wat betekent dat er regelmatig updates nodig zijn.
De afhandeling van protocollen speelt zich, zoals al opgemerkt, op drie lagen af; de hardwarelaag (met MAC), de high-speed datastroom-verwerking plus de stack die het protocol afhandelt. Vaak zijn dit aparte delen in het ontwerp, bijvoorbeeld een ASIC voor de eerste laag en diverse lagen software in de microcontroller voor de andere twee. Het is geen verrassing als dit niet altijd naadloos samenwerkt. Het ontwerpen van een meervoudige industriële netwerkinterface is dan ook een complexe en tijdrovende bezigheid die maanden kan duren.

Kan het niet eenvoudiger?

Anybus, een onderdeel van het Zweedse HMS Networks, ontwikkelt al sinds 1995 complete netwerkinterfaces die alle taken rond de communicatie voor hun rekening nemen. Anybus CompactCom-40 is de vierde generatie, een doorontwikkeling die ook de nieuwste en snelste netwerken ondersteunt, zoals de komende gigabit-netwerken of TSN-protocollen.
Anybus CompactCom combineert alle lagen – hardware, dataverwerking en stack(s) – in de NP40-chip, waarbij de eerste twee delen in een FPGA zijn ondergebracht en de stack op de ingebouwde microcontroller draait die beide voor communicatie zijn geoptimaliseerd. Het werkt met één en dezelfde API voor alle protocollen en dat is uniek.
De kracht van Anybus CompactCom is dat het informatie verwerkt in plaats van doorgeeft. Eigenlijk ontstaat er, naast de bekende lokale en globale varianten, een nieuw soort variabele: de netwerk-variabele. Deze wordt in CompactCom opgeslagen en continu met uw applicatie uitgewisseld. Zodra u een module vervangt door een versie voor een ander protocol, worden nog steeds deze dezelfde variabelen gedeeld en zodoende verandert er voor uw applicatie dus niets. Met slechts één enkele ontwikkeling hebt u toegang tot alle bekende veldbus- en Ethernet-protocollen.
Anybus CompactCom is in verschillende vormfactoren verkrijgbaar. Er is een module (Anybus M40) die eenvoudig in een connector op een printplaat kan worden gestoken (**figuur 2**). De module wordt compleet met de juiste netwerkconnector geleverd; RJ45 voor de Ethernet-varianten en bijvoorbeeld sub-D9 voor Profibus. Het voordeel hiervan is dat de module ook achteraf en eventueel door de eindgebruikers zelf geplaatst kan worden.



Figuur 2. De M40-module compleet met connectoren, en de B40-brick als opsteekbare oplossing, ideaal voor apparaten waar de ruimte beperkt is.



Figuur 3. Anybus CompactCom wisselt informatie uit met de PLC en andere nodes.

Daarnaast is er de B40 Brick (opsteekprint), die eenvoudig op twee headers op een print wordt geprikt. In tegenstelling tot de module heeft deze geen connector, wat de mogelijkheid biedt naar wens elke connector toe te passen. Beide versies maken gebruik van een NP40-chip en zijn technologisch identiek. CompactCom kan via een parallelle aansluiting (8/16 bits) of SPI met de microcontroller in uw applicatie worden geïntegreerd. Verder is een reset noodzakelijk die met een I/O van de microcontroller is gekoppeld. Een kleine software-interface in C-broncode is kosteloos beschikbaar voor de interfacing.

Implementatietijd verkorten heeft veel voordelen

Deze geïntegreerde totaaloplossing van Anybus verkort de implementatietijd aanzienlijk. Zodra de hardware klaar is, is de software in een paar dagen operationeel en wordt de eerste informatie met de PLC of master uitgewisseld.
Anybus CompactCom is pre-gecertificeerd en werkt gegarandeerd volgens de protocolstandaard (**figuur 3**). De pre-certificering van CompactCom versnelt het totale certificeringsproces aanzienlijk, omdat de tests veelal versneld uitgevoerd kunnen worden.

Eenvoud door de vele features

Anybus CompactCom biedt een heleboel extra's. Alle Ethernet-varianten zijn voorzien van een webserver om de uiteindelijke applicatie via een browser te benaderen. Verder kent het een volledige bestandsstructuur via FTP, bijvoorbeeld om host-firmware te kunnen downloaden. Het ondersteunt verder e-mail clients, websockets enzovoort. Voor meer informatie zie [1].

230603-03

WEBLINK

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

WÜRTH ELEKTRONIK
MORE THAN YOU EXPECT

WE are here for you!
Join our free webinars on:
www.we-online.com/webinars

Adrastea-I is a Cellular Module with High Performance, Ultra-Low Power Consumption, Multi-Band LTE-M and NB-IoT Module.

Despite its compact size, the module has integrated GNSS, integrated ARM Cortex M4 and 1MB Flash reserved for user application development. The module is based on the high-performance Sony Altair ALT1250 chipset. The Adrastea-I module, certified by Deutsche Telekom, enables rapid integration into end products without additional industry-specific certification (GCF) or operator approval. Provided that a Deutsche Telekom IoT connectivity (SIM card) is used. For all other operators the module offers the industry-specific certification (GCF) already.

www.we-online.com/gocellular

- Small form factor
- Security and encryption
- Long range/wordwide coverage
- Multi-band support

#GOCELLULAR

De essentiële DFM-checklist

ontwerpen voor productie – hoe doe je dat?

Mark Patrick, Mouser Electronics

De race om nieuwe, op elektronica gebaseerde producten op de markt te brengen houdt nooit op. De ontwerp- en engineeringteams zijn actief in een snelle omgeving waarin ze binnen enkele weken nieuwe prototypes moeten ontwikkelen. Helaas kan de snelheid om een ontwerp om te zetten in een product uitdagingen met zich meebrengen die pas tijdens de productieplanning aan het licht komen. Het gevolg is dat de deadline voor de productlancering niet altijd gehaald wordt, omdat de problemen met het technische ontwerp om meer tijd vragen.

Bijna alle ontwikkelingen op het gebied van elektronica hebben tegenwoordig te maken met meerdere ontwerpbeperkingen. De meest voorkomende betreffen de functies van het product, de beschikbare ruimte en het stroomverbruikprofiel.

Het in productie nemen van een voltooid ontwerp brengt extra uitdagingen met zich mee voor het inkoopteam, zoals:

- beschikbaarheid van onderdelen en doorlooptijden;
- het risico van nagemaakte onderdelen;
- veroudering en andere problemen met betrekking tot de levenscyclus.

De ontwerp- en inkoopteams staan voor veel uitdagingen, maar het introduceren van een DFM-aanpak (Design For Manufacture) biedt een kader voor het oplossen van potentiële problemen voordat de productie begint. Met behulp van een DFM-checklist kunnen fabrikanten de uitdagingen met betrekking tot de productie overwinnen en het hele ontwerp-, toeleverings- en productieproces stroomlijnen.

Identificeer de uitdagingen

Voor het ontwerpteam kan het boeiend zijn om aan een nieuwe project te beginnen. Het startpunt is vaak een marketingspecificatie die de kenmerken, functies en mogelijkheden van een nieuw product definieert op basis van de marktverwachtingen. Het engineeringteam gaat aan de hand van deze specificatie aan de slag met een eerste ontwerpconcept en identificeert tevens een groot aantal andere ontwerpvragen. De samenstelling van een engineeringteam wordt doorgaans bepaald door functionele disciplines, waaronder mechanica, hardware, software en, in toenemende mate, gebruikerservaring. Elk subteam beoordeelt de specificatie en benadrukt mogelijke problemen of de behoefte aan meer informatie.

Veel vragen kunnen van toepassing zijn op meer dan één technische functie of wijzen op potentiële ontwerpbeperkingen. Typische vragen van het mechanische team zijn bijvoorbeeld:

- wordt het product om de pols gedragen? Wat is de maximale optimale maat voor een reeks verschillende gebruikers?
- moet het product water- en stofdicht zijn voor gebruik buitenshuis?

Typische vragen van het elektronica-hardwareteam zijn:

- hoe lang moet de batterij meegaan?
- welk type display past bij de specificatievereisten? Leesbaar bij helder daglicht? Aanraakbediening?
- wat zijn de maximale afmetingen voor de print (PCB)? De ruimte is als een dynamische legpuzzel die plaats moet bieden aan de print, het display en de batterij!

Ieder nieuw ontwerp is als een complexe puzzel die om nauwe samenwerking en communicatie vraagt tussen de toeleveringsketen, productie, marketing en technische functies. De component- of ontwerpbeslissingen van het mechanische engineeringteam kunnen gevolgen hebben, niet alleen voor de collega's, maar ook voor andere bedrijfsfuncties. Een display dat bijvoorbeeld op een bepaalde manier wordt geplaatst, kan resulteren in een onaangename gebruikerservaring en de gevoeligheid en het functioneren van het aanraakscherm beïnvloeden.

Bepaal de ontwerp en productiestrategie

Leg de DFM-strategie vast in een duidelijk kader dat alle ontwerpbeslissingen en de potentiële impact omvat op de:

- inkoop van componenten;
- materiaalafhandeling;

- materiaalkosten;
- productieprocessen;
- eindmontage;
- kwaliteitsborging en testen;
- ondersteuning gedurende de gehele levenscyclus.

Het doel van elk DFM-proces is om productontwikkeling en de productie te vergemakkelijken, de kosten te beheersen en een soepele marktintroductie te realiseren. Een succesvol DFM-kader is een holistisch proces dat communicatie en samenwerking met alle relevante functionele groepen omvat. Los eerst alle ontwerpproblemen, inkoopuitdagingen en productiebeperkingen op om aanzienlijke vertragingen te voorkomen.
Duidelijke, voortdurende en tijdige communicatie is van het grootste belang.

Essentiële punten op de DFM-checklist

Zet zoveel mogelijk, zo niet alle, potentiële onderwerpen op de DFM-checklist. Hieronder vindt u enkele van de meest voorkomende problemen waarmee fabrikanten van elektronische producten te maken krijgen, gegroepeerd per bedrijfsfunctie.

Technische overwegingen

Discreet ontwerp of module:
Dit is een veelvuldig terugkerende uitdaging voor veel engineeringteams. De huidige standaard-IC's zijn uitgerust met verschillende populaire functies. Draadloze transceivers bijvoorbeeld worden vanaf nul ontworpen door gespecialiseerde RF-ingenieurs of aangeschaft als een afzonderlijke, compacte en wettelijk goedgekeurde module. Deze draadloze zendontvangers zijn ook verkrijgbaar als een SoC (wireless system on chip) met een geïntegreerde microcontroller. DC/DC-converters zijn een ander veelvoorkomend voorbeeld. De overwegingen zijn onder andere:

- een module heeft het voordeel dat hij een BOM-item is en enorm veel bespaart op niet-terugvorderbare engineeringkosten. Maar levert hij de exacte parameters die de toepassing vereist?
- een discrete benadering kan voldoen aan de exacte ontwerpcriteria, maar gaat wel ten koste van engineeringtijd en verhoogt de BOM (bill of material). Rechtvaardigt het ontwerp een discrete benadering?
- wat zijn de BOM-kosten van de module in vergelijking met een handvol discrete componenten?
- vergeet ook niet dat de BOM-kosten niet de enige overweging zijn. Het inkopen, beheren en opslaan van de voorraad kan duurder zijn dan de componenten. Welke extra kosten en ongemakken zou dat voor het bedrijf betekenen?
- modules hebben vaak het voordeel dat ze ruimtebesparend zijn en een minimale PCB-footprint hebben. Moet u ruimte besparen in het ontwerp?
- hoe dicht liggen de parameters van het discrete circuit bij een geschikte module? Kan het ontwerp worden aangepast voor een basismodule?

Veiligheid en typegoedkeuring:

- aan welke normen moet het ontwerp voldoen? Algemene voorbeelden zijn gebruikersisolatie, veiligheid, EMI/EMC, RF-typegoedkeuring en/of functionele veiligheid;
- is er sprake van tijdinschattingen en kostenramingen met betrekking tot naleving van de normen? Is er een specialistische vaardigheid die extern advies vereist?
- zou een module de noodzaak voor conformiteitstests wegnemen, de complexiteit van productietests sterk vereenvoudigen en de doorvoercapaciteit verbeteren?

Criteria voor het selecteren van componenten:
Op het eerste gezicht lijkt dit onderwerp relatief eenvoudig. Het kan echter verstrekkende gevolgen hebben bij het inkopen van componenten, het beheren van de BOM en het zoeken naar andere alternatieven. Engineers kunnen een bepaald onderdeel specificeren op basis van de circuitbehoefte zonder daarbij rekening te houden met alternatieven, verschillende leveranciers of inkoopopties.

- passieve componenten worden meestal gespecificeerd met een bepaalde tolerantiewaarde binnen een specifiek seriebereik. Zijn componenten met een geringe tolerantie essentieel? De constructiemethode (keramisch, polymeer enzovoort) heeft ook invloed op de prijs van condensatoren. Door alle onderdelen met dezelfde constructiemethode en een lagere tolerantiewaarde te selecteren, vermindert u de BOM-kosten en de complexiteit, evenals de uitdagingen op het gebied van voorraadbeheer;
- heeft het inkoopteam al een bepaalde component aangeschaft? Hoe was de beschikbaarheid en is er een geschikte tweede bron geïdentificeerd of is daar mogelijk al besteld?
- veel IC's zijn verkrijgbaar in verschillende behuizingen. Is het meest ruimtebesparende onderdeel gespecificeerd?
- moet de IC-behuizing speciaal besteld worden? Zou een meer populaire behuizing ook voldoen aan de ontwerpeisen?
- is de component populair en direct verkrijgbaar? Heeft de fabrikant een uiterste gebruiksdatum aangegeven?

Toeleveringsketen

Beschikbaarheid van componenten:

- heeft engineering alternatieve componenten overwogen die de inkoop vereenvoudigen, de BOM-kosten verlagen en het testen van de productie vergemakkelijken?
- hoeveel materiaalvoorraad wordt er doorgaans besteld en wat betekent dat met betrekking tot de hoeveelheid eindproducten?
- communiceren de leveranciers van uw componenten regelmatig met het inkoopteam? Houden ze u op de hoogte van mogelijke vertragingen, tekorten of capaciteitstoewijzingen?
- is er een lijst opgesteld van kritieke onderdelen die eventueel moeilijk te leveren zijn? Wordt die lijst regelmatig herzien en gecontroleerd? Worden de alternatieven ook gecontroleerd?

Andere inkooprisico's:

- bieden de leveranciers standaard traceerbaarheid van componenten? Nagemaakte onderdelen komen in de hele toeleveringsketen van elektronica voor, dus continue controle is vereist. Ga alleen in zee met gerenommeerde leveranciers en dring aan op traceerbaarheid;
- controleren de leveranciers ook op herverpakte onderdelen? Net als nagemaakte onderdelen leiden deze, eenmaal verwerkt in een product, tot dure uitvaltijd, verlies van productie en extra kosten voor vervangend materiaal;
- wordt al het binnenkomende materiaal gecontroleerd op alle relevante documentatie en certificaten? Certificering kan complex zijn, maar is voor sommige producttoepassingen verplicht.

Productie

Reduceer de afhandelingstijd van componenten:

- hoevaak gaan de ontvangen componenten door de hand? Goedkope items, zoals passieve componenten, nemen weinig ruimte in beslag, maar de tijd en de arbeidskosten om ze van de ene locatie naar de andere te verplaatsen kunnen oplopen. Worden ze afgeleverd waar de productie plaatsvindt?
- vinden de traceerbaarheid van componenten en conformiteitstests plaats tegen de tijd dat de productie plaatsvindt?
- kunnen de leveranciers helpen bij een snellere afhandeling? Bieden ze een 'kitting-service' aan?

Vereenvoudig het assemblageproces:

- uit hoeveel stappen en processen bestaat de assemblage van het eindproduct? Kunnen deze worden gestroomlijnd, of sommige taken worden gecombineerd?
- zou het gebruik van modules de last van het testen en/of inspecteren van de productie verlichten?
- worden onderaannemers ingeschakeld voor bijkomende assemblagetaken? Is dat praktisch en efficiënt? Zouden ze meer kunnen doen, of betreft het specialistisch werk?

Naast factoren die van invloed zijn op specifieke bedrijfsfuncties, brengt het mondiale karakter van de toeleveringsketen van elektronicacomponenten ook meerdere geopolitieke, duurzaamheids- en milieuoverwegingen met zich mee.

Mondiale overwegingen

- volgt u of uw leverancier de levering van grondstoffen aan fabrikanten van componenten? Heeft u componenten die afhankelijk zijn van zeldzame aardmineralen of samenstellingen waarvan er een tekort bestaat?
- hoe groot is de blootstelling van uw toeleveringsketen aan regionale of nationale handelsgeschillen of geopolitieke spanningen? Bent u geabonneerd op de nieuwsbrief van een van uw relevante leveranciers?
- wat is uw beleid op het gebied van milieu, maatschappij en goed bestuur? Controleert u of een externe organisatie uw leveranciers en houdt u toezicht op hun duurzaamheidsprestaties?
- publiceert u een beleid voor maatschappelijk verantwoord ondernemen? Hoe is dit beleid afgestemd op uw productontwerp en engineeringmethoden?
- zijn uw leveranciers gevestigd in regio's die te maken hebben gehad met of gevoelig zijn voor milieurampen? Is er een rampenplan voor het geval deze zich opnieuw voordoen en de toeleveringsketen ontwrichten?

Deze DFM-checklist dekt slechts enkele van de betrokken stappen bij het formuleren en implementeren van een DFM-strategie. Een regelmatige en betrokken communicatieve benadering van alle interne functies, leveranciers van componenten en fabrikanten van subassemblages stelt u in staat om problemen in een vroeg stadium op te sporen.

Mouser ondersteunt uw DFM-strategie met online-tools en -diensten

Mouser biedt gratis tools, zoals Forte, een BOM-beheer- en een inventaristoepassing om uw behoeften op het gebied van componentsourcing te ondersteunen. Deze tools kunnen de basis vormen voor het beheer van uw product gedurende de gehele levenscyclus. De tijdbesparende functies van Forte omvatten:

- een vertrouwensindicator om te controleren of het juiste artikel uit de BOM is geselecteerd;
- prijsverschillen voor meerdere aantallen worden gemarkeerd met veranderende BOM-hoeveelheden;
- BOM-importmogelijkheid met behulp van elk gangbaar spreadsheetbestand, of zelf aan te maken in Forte;
- melding van mogelijke voorraad- en verouderingswaarschuwingen;
- een EBOM-exportfunctie.

Op [1] vindt u een complete lijst met de belangrijkste functies van Forte, samen met een quick-start guide.
Tijdens de hardware- en mechanische ontwerpfase kunt u uitgebreide productinformatie, zoals datasheets, 3D CAD-modellen en PCB-footprints, gratis downloaden van [2]. Daarnaast is er een verzameling handige tools, zoals conversiecalculators, Project Share, API's, orderautomatisering, diverse diensten en nog veel meer te vinden op [3]. Start uw ontdekkingstocht.

230576-03

Over de auteur

Als Technical Marketing Manager van Mouser Electronics voor EMEA is Mark Patrick verantwoordelijk voor het creëren en verspreiden van technische content binnen de regio – content die essentieel is voor de strategie van Mouser om het engineeringpubliek te ondersteunen, te informeren en te inspireren. Voordat hij het Technical Marketing-team leidde, maakte Patrick deel uit van het EMEA Supplier Marketing-team en speelde hij een cruciale rol bij het aangaan en ontwikkelen van relaties met belangrijke productiepartners. Naast diverse technische en marketingfuncties heeft Patrick onder andere acht jaar gewerkt bij Texas Instruments in Applications Support en Technical Sales. Hij is een 'hands-on' ingenieur in hart en nieren en heeft een passie voor vintage synthesizers en motorfietsen. Patrick heeft een eerstegraads Honours Degree in Electronics Engineering van de universiteit van Coventry.

WEBLINKS

[1] Lijst met de belangrijkste functies van Forte: https://eu.mouser.com/bomtool
[2] Datasheets, 3D CAD-modellen en PCB-footprints: https://eu.mouser.com/electronic-cad-symbols-models
[3] Mouser online-tools en -diensten: https://eu.mouser.com/servicesandtools

Word lid van de Elektor Community

Neem **nu** een elektor GOLD membership lidmaatschap!

- Een compleet web-archief t/m 1980!
- 8x Elektor Magazine (Print)
- 8x digitaal (PDF)
- 10% korting in onze webshop,en exclusieve aanbiedingen
- Toegang tot meer dan 5000 Gerberfiles

Ook verkrijgbaar

Het digitale elektor GREEN membership lidmaatschap!

- Toegang tot ons web-archief
- 10% korting in onze webshop
- 8x Elektor Magazine (PDF)
- Toegang tot meer dan 5000 Gerberfiles

www.elektormagazine.nl/Abonnement

elektor design > share > earn

Filamenten voor 3D-printen

soorten, kenmerken en gebruik bij prototyping

Een bijdrage van Transfer Multisort Elektronik Sp. z.o.o.

3D-printen is al behoorlijk ingeburgerd in de markt, hoewel het in de waarneming van velen nog vrij nieuw en innovatief is. De mogelijkheid om complete objecten vanaf nul te printen heeft niet alleen de manier waarop we over prototyping denken sterk veranderd, maar ook het proces om dit soort projecten te realiseren. Net zoals een traditionele printer niet zonder inkt of toner kan, zo kan een 3D-printer ook niet zonder filament. Dit filament kan verschillende eigenschappen hebben waar u op moet letten bij het kiezen van het materiaal.

Bron: © mari1408/Adobe Stock

Wat zijn filamenten voor 3D-printen?

Filamenten voor 3D-printen [1] zijn thermoplastische materialen die worden gebruikt om driedimensionale objecten te printen door laagsgewijze afzetting van gesmolten materiaal met een 3D-printer. Ze zijn verkrijgbaar in verschillende soorten en kleuren en worden gemaakt van materialen als ABS (acrylonitril-butadieen-styreen), PLA (polylactide), PET (polyethyleentereftalaat), nylon en vele andere. Ze worden geleverd in de vorm van draadn die op een spoel is gewikkeld en van daar in de 3D-printer kan worden ingevoerd. Het afgerolde thermoplastische materiaal wordt door een mondstuk geperst dat is verhit tot een temperatuur die het laat smelten. Het mondstuk dat de materiaalstroom regelt, beweegt ruimtelijk volgens de instructies van software (bijvoorbeeld CAM). Dit doet denken aan stereolithografie (SLA), wat ook is gebaseerd op het aanbrengen van opeenvolgende lagen die met een laser wordt uitgehard. 3D-printen wordt op steeds meer gebieden toegepast, waardoor de lijst met verkrijgbare soorten filament steeds langer wordt. Sommige zijn gemaakt van natuurlijke grondstoffen, terwijl andere volledig zijn samengesteld uit kunstmatige materialen. Al deze soorten hebben echter één ding gemeen: ze hebben de vorm van dunne, enkele tientallen of zelfs honderden meters lange vezels die op spoelen van verschillend formaat zijn gewikkeld. Deze spoelen kunnen eenvoudig op de printer worden gemonteerd of gedemonteerd; kappen aan de zijkant voorkomen dat de vezels van de spoel kunnen glijden.

Filamenten van de betere leveranciers zijn in principe verkrijgbaar in twee vezeldiameters: 1,75 mm en 2,85 mm. Doorgaans worden ze zorgvuldig gemaakt, zonder dikteverschillen of onregelmatigheden. Dit is erg belangrijk voor de kwaliteit van het printproces, omdat met elke verdikking te veel materiaal in de spuitmond komt waardoor het materiaal zich iets anders gedraagt op het moment dat de laag wordt aangebracht. Houd er rekening mee dat de dikte van een typische enkelvoudigee laag ongeveer 80% van de diameter van de spuitmond bedraagt, meestal iets minder dan een halve millimeter (voor een mondstuk van 0,4 mm diameter is de printdikte 0,32 mm).

Eigenschappen van de belangrijkste soorten filamenten

Er zijn veel soorten filamenten die gemaakt van diverse materialen gemaakt zijn. Er is echter een groep die absoluut het populairste is en die u daarom zeker moet kennen als u gaat werken met 3D-printers:

ABS (acrylonitril-butadieen-styreen)

Dit is een van de populairste soorten filament voor 3D-printen. ABS is duurzaam en bestand tegen compressie en mechanische slijtage, en kan daarbij goed tegen hoge temperaturen. Het is daarom een ideaal materiaal voor het printen van elementen die langdurig aan veeleisende omstandigheden worden blootgesteld. Het kan echter moeilijk te hanteren zijn en tijdens het printen gevaarlijke en onaangename geuren afgeven. Zonder een verwarmd printplateau en lijm kan het kromtrekken. De printtemperatuur varieert van 210 °C tot 250 °C. ABS-filamenten [2] worden gemaakt in een thermoplastisch syntheseproces, dat bestaat uit het mengen van drie componenten: acrylonitril, butadieen en styreen in een speciale continumixer om een homogene massa te verkrijgen. Deze massa wordt verhit tot een hoge temperatuur om hem te smelten en wordt dan door een mondstuk geperst om dunne draden te vormen. In

de volgende stap worden deze gekoeld en op rollen gewikkeld. Het goed mengen van de bestanddelen en het goed smelten en vormen van de vezels is cruciaal om filamenten van hoge kwaliteit te verkrijgen die goed presteren in 3D-printers.
Typische toepassingen voor ABS zijn onder andere huishoudelijke artikelen, fietshelmen en bouwsteentjes voor kinderen. Ook allerlei behuizingen, schermen, handgrepen, hendels of kleine accessoires zijn van ABS. Belangrijk is dat dit materiaal niet in contact komt met levensmiddelen.

PLA (polylactide)

Dit is een niet-giftig en biologisch afbreekbaar type filament, gemakkelijk te verwerken en veilig voor het milieu, waardoor het tegenwoordig het populairste filament is voor 3D-printen. PLA is flexibeler en minder goed bestand tegen hoge temperaturen dan ABS. Tegelijkertijd is het gemakkelijker om te printen omdat het niet kromtrekt en geen verwarmd plateau vereist, lagere printtemperaturen nodig heeft (180...230 °C) en geen onaangename geuren afgeeft. Het toepassingsgebied van PLA is zeer breed en omvat bijvoorbeeld tentoonstellingsproducten (poppen) of uiteenlopende constructie-elementen, waarvoor veel kleurversies bestaan. PLA-filamenten [3] ontstaan ook in een thermoplastisch syntheseproces. Bij dit proces worden natuurlijke grondstoffen (bijvoorbeeld maïszetmeel) gemengd met chemische additieven zoals melkzuur (polymelkzuur) en polyethyleenglycol. Deze massa wordt, net als bij vrijwel alle filamenten, verhit tot een hoge temperatuur en daarna door een geschikt mondstuk geperst om dunne draden te vormen. In de volgende stap worden deze weer gekoeld en op rollen gewikkeld.
Een belangrijk punt is de geringe weerstand van PLA tegen hogere temperaturen; daarom mogen elementen die zijn geprint met dit materiaal niet worden gebruikt bij temperaturen hoger dan 55...60 °C. Een groot voordeel is echter dat componenten van deze grondstof kunnen worden gebruikt als basis voor het werken met speciale (bijvoorbeeld geleidende) filamenten, en natuurlijk dat het biologisch afbreekbaar is.

PETG (polyethyleen-tereftalaat-glycol)

Dit is een duurzaam en flexibel type filament dat bestand is tegen water en chemicaliën. Het wordt daarom regelmatig gebruikt voor het printen van bijvoorbeeld flessen en andere verpakkingen. PETG-filamenten [4] ontstaan bij thermoplastische synthese van grondstoffen zoals tereftaalzuur en glycerol en verschillende chemische toevoegingen, bijvoorbeeld antioxidanten en stabilisatoren. De bestendigheid van dit filament tegen chemicaliën (olie, vet en benzine) is zijn grootste voordeel, vandaar de wijdverbreide toepassing. Verder is het transparant, wat in veel toepassingen van grote betekenis is.

PA (nylon)

Dit is een duurzaam en flexibel type filament, onoplosbaar en bestand tegen mechanische beschadigingen. Nylon wordt vaak gebruikt om onderdelen te printen die zware belastingen moeten weerstaan, zoals tandwielen en trekveren. U moet echter rekening houden met de hygroscopische eigenschappen, en voor bescherming tegen de schadelijke dampen zorgen die tijdens het printen vrijkomen. Nylon-filamenten [5] ontstaan bij thermoplastische synthese van grondstoffen als azelaïnezuur en glycerol waaraan ook nog antioxidanten en stabilisatoren worden toegevoegd.

PC (polycarbonaat)

Dit is een type filament dat bestand is tegen hoge temperaturen en dat uitermate duurzaam is. PC, bekend als polycarbonaat, wordt vaak gebruikt voor het printen van onderdelen die bestand moeten zijn tegen hoge temperaturen en belastingen. PC-filamenten worden geproduceerd in een thermoplastisch syntheseproces, waarbij grondstoffen zoals bisfenol A en carboxylzuur worden gemengd met chemische additieven zoals antioxidanten en stabilisatoren.

TPE (thermoplastische elastomeren) en zijn varianten

Dit zijn kunststoffen met rubberachtige eigenschappen, waardoor ze extreem flexibel en duurzaam zijn. We wijzen er wel op dat het niet gaat om één type materiaal, maar om een brede klasse van copolymeren en polymeermengsels, waarvan de zachte en rekbare vezels bestand zijn tegen spanningen die ABS of PLA niet aankunnen. TPE-filamenten [6] worden algemeen gebruikt voor auto-onderdelen, huishoudelijke apparaten en medische artikelen. Ze zijn echter niet gemakkelijk te hanteren – TPE veroorzaakt vaak problemen bij het in vorm brengen.
Een bijzondere variant van TPE is thermoplastisch polyurethaan (TPU) [7]. Filamenten van dit materiaal zijn bijzonder populair. Vergeleken met het gewone TPE is dit materiaal iets stijver, waardoor het gemakkelijker te printen is. Het is ook iets duurzamer en behoudt zijn flexibiliteit beter bij lage temperaturen. Net als TPE is het echter een veeleisend printfilament – het vereist een smal filamentpad en een lage printsnelheid bij een temperatuur van 210...230 °C.
Een ander type TPE is thermoplastisch copolyester (TPC). Het wordt niet zo vaak gebruikt, maar in bepaalde toepassingen is het aan te raden omdat het beter bestand is tegen chemicaliën, uv-straling en temperaturen tot 150 °C zonder het materiaal al te zeer te beschadigen.

3D-printen bij prototyping

Het belang van 3D-printen voor prototyping kan tegenwoordig niet worden overschat. Deze technologie maakt het mogelijk om snel en goedkoop fysieke modellen te maken, waardoor de ontwerp- en testfase korter wordt en veel snellere implementatie van het product in zijn uiteindelijke vorm mogelijk is. Op basis van 3D-printen kunnen ontwerpers en ingenieurs vele fysieke varianten van het betreffende product maken om de vorm, grootte en functionaliteit te testen en vervolgens de beste optie te kiezen. Dit is perfect in bijvoorbeeld de auto-industrie, waar 3D-printen vaak wordt gebruikt bij het ontwerpen en maken van prototypen van carrosserie-elementen of onderdelen die later in voertuiginterieurs worden gemonteerd.
Een ander voorbeeld van het gebruik van 3D-printen bij prototyping

is het maken van medische modellen, zoals prothesen, endoprothesen of chirurgische instrumenten. Ook hier is de verkorting van de zoektijd naar de uiteindelijke vorm van groot belang, waardoor de populariteit van 3D-printers in de medische industrie in een zeer hoog tempo toeneemt. Ten slotte vermelden we nog de prototyping van matrijzen voor spuitgieten – ook hier maakt het gebruik van 3D-printen uiteindelijk snelle en gemakkelijke productie van nieuwe kunststofproducten mogelijk.
Er is nog een andere dimensie aan het gebruik van 3D-printen in prototypingprocessen – de financiële. Zelf prototypes maken, in plaats van ze uit te besteden, is veel goedkoper en biedt bovendien betere bescherming van het intellectuele eigendom van de betrokken fabrikant.

3D-printen in elektronica

Het spreekt voor zich dat 3D-printen ook wordt toegepast bij het ontwerpen van elektronica. Tijdens het CAD/CAM-ontwerpproces worden afzonderlijke programma's gebruikt voor het ontwerpen van printen, elektrotechnische componenten en behuizingen. Met de mogelijkheid om direct te printen, kunnen deze behuizingen snel en efficiënt worden ontworpen en gemodelleerd tot ze optimaal zijn.
De nieuwste oplossingen hebben echter nog meer mogelijk gemaakt: de behuizing printen [8] met de elektronica er al in verwerkt. Dit is het resultaat van het combineren van twee tot nu toe vrij onafhankelijke processen – 3D-printen en automatische plaatsing van componenten op een print [9] – met een zeer interessante oplossing: geleidend filament. Het resultaat is dan een machine voor de productie van volledig functionele elektronische apparaten. Eerst moet het hele geleidende circuit in de juiste omgeving worden ontworpen en vervolgens naar de software worden gestuurd die het geheel combineert tot een bestand waaruit de printer informatie leest over het printen van de behuizing, het maken van geleidende verbindingen en het plaatsen van de componenten.
3D-printen maakt ook productie van kleine series, individuele bestellingen of de productie van elementen voor bètatesten mogelijk. Bovendien kunnen zo reserveonderdelen voor niet-standaard apparatuur worden geprint, onderdelen die normaliter bijzonder duur zijn.

Bron: © ProstoSvet / Adobe Stock

Filamenten in het aanbod van TME

TME biedt filamenten die zijn geproduceerd door bekende leveranciers en die een breed scala aan materialen vertegenwoordigen op basis van synthetische en natuurlijke ingrediënten.
Het gaat hier om kunststoffen als ABS in verschillende uitvoeringen, ASA (acrylonitril-styreen-acrylaat) [10], HIPS (High Impact Polystyrene) [11], PA (nylon ofwel polyamide), PCABS (een mengsel van polycarbonaat en ABS) [12], PET (polyethyleentereftalaat), PLA (polylactide), PMMA (polymethylmethacrylaat) [13], PVA (polyvinylalcohol) [14], SILK (glanzende variant van PLA) [15] en de thermoplastische elastomeren TPE en TPU. Het aanbod wordt aangevuld door filamenten die geschikt zijn voor specialistische industriële toepassingen uit de serie iglidur® [16], op basis van hoogwaardige basispolymeren met een mengsel van verschillende soorten vezels en vaste smeermiddelen. Deze laatste bestanddelen geven de materialen de voorkeurseigenschappen die nodig zijn in specifieke gespecialiseerde toepassingen, bijvoorbeeld de noodzakelijke duurzaamheid, sterkte of beperkte wrijving en slijtage van de elementen die met dit materiaal zijn geprint. Dit maakt ze ideaal voor het maken van bijvoorbeeld lagers.

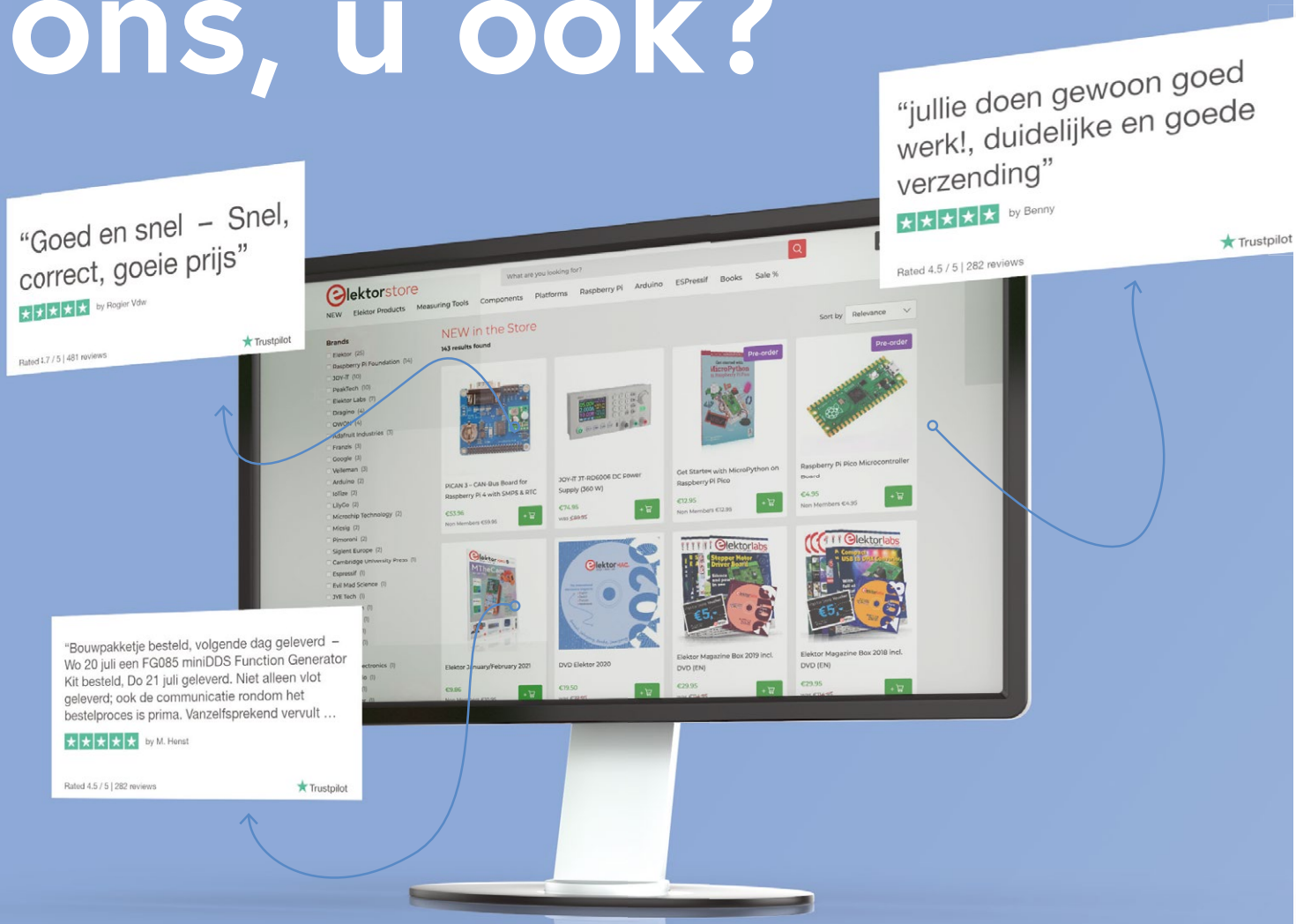
230577-03

WEBLINKS

[1] Filamenten voor 3D-printen: https://tinyurl.com/tmefilamentNL
[2] ABS-filamenten: https://tinyurl.com/tmeabsfilamentNL
[3] PLA-filamenten: https://tinyurl.com/tmeplafilamentNL
[4] PETG-filamenten: https://tinyurl.com/tmepetgfilamentNL
[5] Nylon-filamenten: https://tinyurl.com/tmenylonfilamentNL
[6] TPE-filamenten: https://tinyurl.com/tmetpefilamentNL
[7] TPU-filamenten: https://tinyurl.com/tmetpufilamentNL
[8] Behuizingen voor elektronica: https://tinyurl.com/tmebehuizingen
[9] Universele PCBs: https://tinyurl.com/tmeunipcbNL
[10] ASA-filamenten: https://tinyurl.com/tmeasafilamentNL
[11] HIPS-filamenten: https://tinyurl.com/tmehipsfilamentNL
[12] PCABS-filamenten: https://tinyurl.com/tmepcabsfilamentNL
[13] PMMA-filamenten: https://tinyurl.com/tmepmmafilamentNL
[14] PVA-filamenten: https://tinyurl.com/tmepvafilamentNL
[15] SILK-filamenten: https://tinyurl.com/tmesilkfilamentNL
[16] Filamenten uit de iglidur-serie: https://tinyurl.com/tmeiglidurfilamentNL

Transfer Multisort Elektronik B.V.
Croy 7 - 5653 LC Eindhoven
tme@tme-benelux.nl - www.tme.eu/nl

Zij vertrouwen ons, u ook?



Wij houden van elektronica en van projecten, en doen ons uiterste best om aan de behoeften van onze klanten te voldoen.

De Elektor Store: '**Nooit duur, altijd verrassend**'

"Zeer vlotte afhandeling van de bestelling en zeer concurrentiële prijs."
by Walter Lippens
Rated 4.5 / 5 | 282 reviews
Trustpilot

Bekijk meer beoordelingen op onze Trustpilot-pagina: www.elektor.nl/TP

Of oordeel zelf door een bezoek te brengen aan onze Elektor Store, www.elektor.nl

elektor
design > share > earn

Specialisten voor **effectieve signaalanalyse** van de **ELF-** tot de **EHF-band**

de nieuwste real-time SPECTRAN® V6 serie spectrumanalyzers van Aaronia

De SPECTRAN V6-serie van Aaronia bestaat uit USB real-time spectrumanalyzers die zijn geoptimaliseerd voor hoogfrequente signaalanalyse. Ze zijn snel, veelzijdig en worden geleverd met gebruiksvriendelijke software. Verschillende modellen zijn geschikt voor verschillende budgetten en het bedrijf maakt bij toekomstige upgrades inruil mogelijk.

Een bijdrage van Aaronia AG

De millimetergolf of extreem hoge frequentieband (EHF) biedt een enorme bandbreedte en hoge resolutie vanwege de hoge frequenties en bijbehorende korte golflengtes. De hoge frequentie vormt echter ook een grote uitdaging voor signaalanalyse, omdat de propagatie van EHF-signalen gevoelig is voor absorptie en verstrooiing. Met de real-time USB-spectrumanalyzers van de SPECTRAN® V6 serie biedt Aaronia AG de juiste hulpmiddelen voor alle gewenste analyses.

De real-time spectrumanalyzers van de SPECTRAN® V6 X USB-serie zijn speciaal ontworpen voor nabije veld- en verre veld-metingen, voor het meten en lokaliseren van storende stralingsbronnen of voor het opsporen van EMC-problemen. De real-time bandbreedte tot 450 MHz en de sweep-snelheid van > 3.000 GHz/s maken de noodzakelijke metingen aanzienlijk sneller en besparen zo tijd en geld.

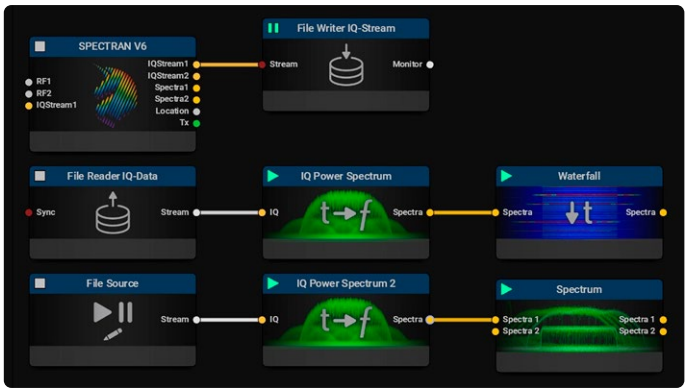
Binnen het frequentiebereik van 9 kHz tot 55 GHz kunnen de nieuwe SPECTRAN® V6 X analyzers uit de PLUS-serie zelfs extreem korte stoorsignalen detecteren en lokaliseren zodat men de oorzaak ervan kan vaststellen of elimineren. De sweepsnelheid van de ECO-, 5G- en XPLORER-series loopt tot 3 THz/s. Hierdoor kan het spectrum sneller worden bijgewerkt en kunnen kortstondige signalen worden gedetecteerd, wat vooral belangrijk is bij het analyseren van frequentiesprongen of bij het zoeken naar sporadische interferentie. Als bijvoorbeeld een SPECTRAN® V6-analyzers met twee ingangen wordt ingezet, kunnen de twee ingangen worden gebruikt om tegelijkertijd voor en achter een afscherming te meten. De resultaten kunnen dan in real-time met elkaar worden vergeleken zonder bijvoorbeeld de meetopstelling te veranderen of kabels opnieuw te hoeven aansluiten. Dit vereenvoudigt de metingen en vergt minder moeite.

Door meerdere SPECTRAN® V6-analyzers te combineren kan de real-time bandbreedte naar wens worden vergroot. Door slechts vier V6-analyzers te combineren is bijvoorbeeld onderbrekingloos real-time meten mogelijk van 20 MHz tot 1 GHz, wat een enorm tijdvoordeel oplevert voor een groot aantal metingen.

"Zowel de meettechnologie als de eisen die eraan worden gesteld veranderen razendsnel," zegt Thorsten Chmielus, Managing Director van Aaronia AG. "Met onze real-time USB-spectrumanalyzers zijn we in staat om snel te reageren op nieuwe omstandigheden. Met de voortdurende verdere ontwikkeling van de SPECTRAN®-serie zetten we altijd nieuwe maatstaven en maken we onze producten klaar voor de toekomst."

Figuur 1. SPECTRAN® V6 ECO 150XA-6 met één ingang (Rx) met 44 MHz RTBW en een extra 44 MHz Tx-uitgang.

Figuur 2. SPECTRAN® V6 5G-500XA-50 met Rx 'lage frequentie' en Rx 'hoge frequentie'.



Figuur 3. RTSA-Suite PRO die een opname maakt van de volledige IQ-bandbreedte.

Goede prestaties voor een klein budget – SPECTRAN® V6 ECO

Met de SPECTRAN® V6 ECO (**figuur 1**) opent Aaronia een nieuw marktsegment in real-time spectrumanalyse. In de basisversie biedt het apparaat een real-time bandbreedte (RTBW) van 44 MHz en een uitgebreid frequentiebereik van 9 kHz tot 6 GHz. Het instapmodel ECO 100XA-6, inclusief de speciale RTSA-Suite PRO-software kost minder dan € 1500, een revolutie op de markt van real-time spectrumanalyzers. Het instrument is ook leverbaar met geïntegreerde signaalgenerator of als dual RX-variant. Deze laatste vult de kloof tussen betaalbare SDR's met laag vermogen en dure en snelle high-end analyzers. Met zijn twee onafhankelijke ingangen biedt de SPECTRAN® V6 ECO 200XA-6 enerzijds 2 × 44 MHz RTBW. Anderzijds bereikt hij een sweepsnelheid tot 3 THz/s met de unieke, gepatenteerde hoge-snelheid tictoc-LO-functie.

Volgend jaar zullen de apparaten ook verkrijgbaar zijn als 18GHz-versie voor minder dan € 10.000, inclusief signaalgenerator. Verder kunnen dan bijna alle modellen worden uitgebreid met een optionele PowerMeter-ingang, die betrouwbaar signaalpieken tot 70 GHz kan detecteren.

Voor metingen op het gebied van mobiele radio zijn de instrumenten uit de SPECTRAN® V6 5G-serie (**figuur 2**) zeer interessant. Naast de bestaande FR1-band ondersteunen ze ook de nieuwe 5G-banden tussen 24 GHz en 53 GHz (FR2) en WiGig 45 GHz (802.11aj). De bijbehorende frequentieprofielen zijn nu opgenomen in de nieuwste versie van RTSA Suite PRO.

Software is de sleutel

Maar niet alleen de real-time bandbreedte en de POI- en sweep-snelheid van de hardware zijn verbazingwekkend. De gebruikte software speelt een doorslaggevende rol. Met de modulaire RTSA-Suite PRO-software voor real-time spectrum controle en analyse biedt Aaronia een krachtig softwarepakket voor signaalregistratie en gegevensanalyse. Zo maakt de Record & Replay-functie van de SPECTRAN® V6 in combinatie met RTSA-Suite PRO het mogelijk om de volledige IQ-bandbreedte op te nemen en opnieuw af te spelen (**figuur 3**). Zo kan alle informatie die nodig is om een signaal te herstellen worden opgeslagen op de lokaal aangesloten computer voor gedetailleerd onderzoek. Een ander onschatbaar voordeel is de praktisch onbeperkte opnameduur, die alleen afhangt van de capaciteit van de gebruikte opslagmedia.

Gebruiksgemak is een topprioriteit voor Aaronia. Dankzij het modulaire systeem kunnen zelfs complexe meettaken binnen zeer korte tijd geconfigureerd worden door middel van slepen&neerzetten. Door verschillende blokken te combineren wordt de meetopstelling gevisualiseerd. Veelgebruikte zogenaamde 'missions' kunnen worden opgeslagen als voltooide projecten en indien nodig weer worden opgeroepen. Op de website van Aaronia [1] kunnen talloze voorgedefinieerde configuraties worden gedownload. Deze kunnen in RTSA-Suite PRO worden geïmporteerd, zodat metingen direct gestart kunnen worden. Als er kosten verbonden zijn aan de extra functies, biedt Aaronia alle bestaande klanten de mogelijkheid om de functie te testen in 30-daagse testversies met volledige functionaliteit.

Veel modules, met een totale waarde van € 7782, zijn al gratis inbegrepen in de basisversie. Dit zijn onder andere diverse 2D- en 3D-weergaven, IQ-verwerking, triggers, AM/FM-decoders, bestandslezer en -schrijver, remote HTTP of scripts.

Niet alleen voor de SPECTRAN® V6

De RTSA-Suite PRO kan niet alleen worden gebruikt met Aaronia-meetinstrumenten, maar is ook compatibel met apparaten van andere merken en breidt hun gebruiksmogelijkheden uit. Als u bijvoorbeeld uw Tektronix-spectrumanalyzer uitbreidt met RTSA-Suite PRO via een softwarelicentie voor ongeveer € 2500, krijgt u als bonus de bestandslezer/schrijver voor het opslaan en afspelen van gegevens ter waarde van € 4550.

Upgrade-service

Aaronia biedt een exclusieve inruilservice voor haar producten. Als een oud apparaat of de vorige versie van een product moet worden ingeruild voor een nieuw product, is een korting tot 50% van de oorspronkelijke prijs mogelijk voor het nieuwe apparaat. Het enige wat u hoeft te doen is het oude apparaat en de originele factuur opsturen. Dit aanbod geldt voor alle actieve componenten, zoals meetinstrumenten en versterkers.

Hoe ziet de toekomst eruit?

Aaronia werkt al aan de volgende SPECTRAN®-generaties. Met een frequentiebereik tot 110 GHz (afhankelijk van het model) is de SPECTRAN® V6 XPLORER de nieuwe speler in het hoogfrequente bereik. Als kosteneffectief ontwikkelingsplatform opent het dankzij zijn prestaties volledig nieuwe toepassingsgebieden.

230580-03

WEBLINK

[1] Website Aaronia: https://aaronia.com

Uitdagingen van DFM-analyse voor flex- en rigid-flex-ontwerpen

Flex- en rigid-flex-PCB's verschillen van stijve PCB's met betrekking tot materialen, constructie en ontwerpuitdagingen. Ze worden gebruikt in gespecialiseerde toepassingen zoals medische apparaten. Analysetools evolueren om aan hun unieke vereisten te voldoen.

Een bijdrage van DownStream Technologies

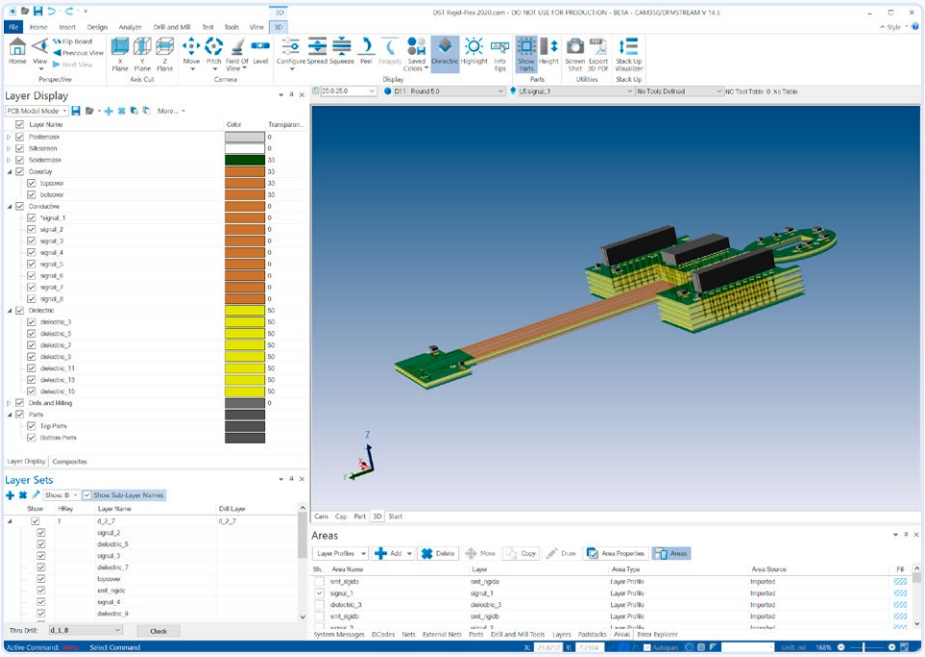
Flex- en rigid-flex-printen zijn geen nieuw idee. Ze worden tegenwoordig heel vaak toegepast, omdat we op zoek zijn naar alternatieve behuizingen voor steeds kleinere elektronische producten. Een eenvoudig schema voor een rechte, platte kabel is een analogie van zijn fysiek plat substraat. Een schema op meerdere pagina's voor een rigid-flex-ontwerp lijkt nauwelijks op het driedimensionale eindproduct, dat uit verschillende materialen bestaat. Toch kunnen bij beide voorbeelden analysetools worden gebruikt die op basis van dat schema werken. Dat geldt ook voor gewone twee- of meerlaags FR4-printen. Moderne print-analysetools zijn geschikt voor alle combinaties van starre printen, ongeacht het aantal lagen en de afmetingen. Maar voor de unieke eigenschappen van flexibele substraten en van de combinatie van flexibele en starre substraten zijn specifieke analyses nodig, zowel voor de functionaliteit als voor de fabricage. Analyse van de impedantie, koppeling, overspraak en storingsgevoeligheid is ingewikkeld door de verschillende stack-ups bij flexibele printen. Eén en dezelfde transmissielijn kan een stripline zijn in een star deel en een microstrip in een flexibel deel van het ontwerp. Materiaaltypen en diëlektrische constanten boven en onder een spoor kunnen onderweg verschillen als het het ontwerp doorloopt. Hoewel de uitdagingen voor signaalintegriteitsanalyse voor flexibele ontwerpen het bespreken waard zijn, behandelen we in dit artikel vooral de huidige uitdagingen bij Design for Manufacture-analyse (DFM) van flex- en rigid-flex-ontwerpen.

Het verschil tussen starre, flex- en rigid-flex-printen

Sommige engineers ontwerpen flexibele PCB's gewoon als buigzame printen, maar er zijn grote verschillen tussen star en flexibel. Beide technologieën zorgen voor elektrische verbindingen, maar ze worden gefabriceerd met verschillende materialen en processen. Ze hebben ook verschillende toepassingen. Voor het moederbord van een desktop-PC hoeven we geen rigid-flex-PCB te ontwerpen, maar dat is wel nodig voor de meeste medische implantaten.

Een typische starre print bestaat uit lagen van met koper beklede glasvezelversterkte kunststofsubstraten op elkaar. Er bestaan wel variaties in de materialen die worden gebruikt om de substraten te binden, maar het zijn over het algemeen geweven lagen die zijn geïmpregneerd met niet-uitgehard epoxy. Dit materiaal is niet ontworpen om flexibel te zijn. Het koper wordt chemisch geëtst om een patroon voor de schakelingte creëren. De hardheid van de verbonden substraten maakt mechanisch frezen nodig om de ruwe printen op maat te maken. Alle lagen van de print zijn normaal gesproken even groot en gelijk van vorm, tenzij er sprake is van holtes, ingebedde componenten of andere exotische constructies. De stapeling van lagen is over de hele print hetzelfde. Er worden vrijwel altijd een soldeermasker en opdruk aangebracht.

Flexibele printen bestaan uit gewalst, gegloeid koper op flexibele polyimide-substraten. Flexibele lagen of cores worden geproduceerd met of zonder lijm. Lijmloze flex is gangbaar bij toepassingen waar grote prestaties verlangd worden, flex met lijm wordt vaak gebruikt voor toepassingen met een beperkt aantal lagen. De meest gebruikelijke vorm is koperfolie op een substraat met epoxy- of acryllijm. Zowel het substraatmateriaal als de lijm zijn ontworpen om te kunnen buigen, zodat het risico van

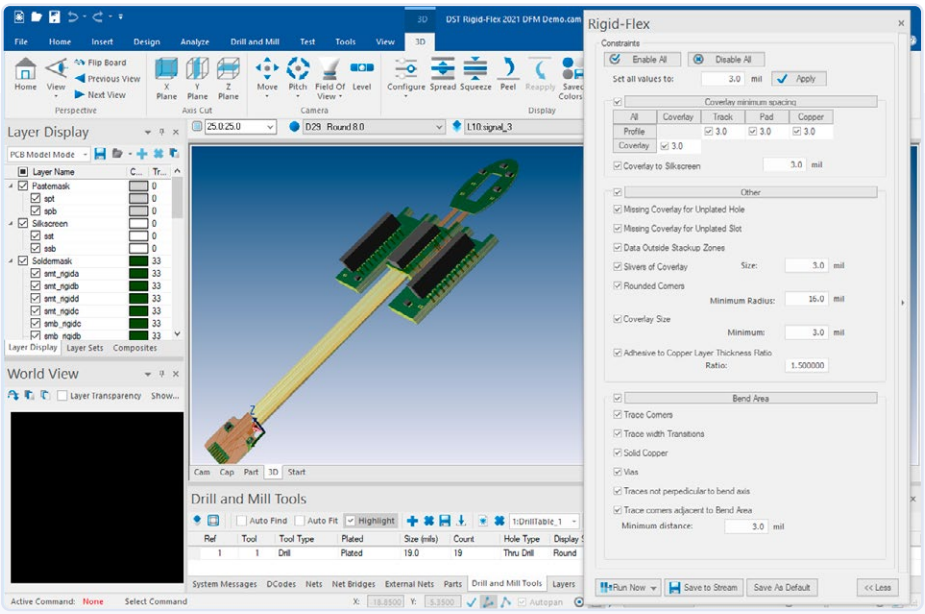


Figuur 1. Een rigid-flex ontwerp in 3D; de lagen voor de duidelijkheid zijn van elkaar gescheiden.

breuk wordt geminimaliseerd. Ook hier wordt een chemisch etsproces gebruikt voor het vormen van een patroon. Het flexibele karakter van de materialen vraagt om die-cutting of 'blanking' in plaats van mechanisch frezen. Elke laag van een flexibele dubbelzijdige core heeft een identieke vorm. Maar meerlaags flex zal vaak een verschillende vorm hebben voor elke laag of core. Flexibele PCB's hebben een dunne film-isolator over de geleiders nodig, een zogenaamde coverlay. In tegenstelling tot de soldeermaskers van starre printen, zijn coverlays meestal die-cut, net als de flexibele lagen die ze isoleren. De stapeling van een meerlaags flexibele print kan variëren over het oppervlak. Dat geldt vooral voor meerlaags flex, waar de vorm van de lagen onderling varieert. Een flexibel massa- of voedingsvlak wordt meestal gearceerd in plaats van volledig gevuld, zoals bij starre printen. De arcering reduceert de kans op breuk van de geleiders. Flexibele lagen kunnen ook worden afgeschermd met een laag koper- of zilverfolie. Maskering en opdruk van flexibele lagen is niet echt zeldzaam, maar wel ongebruikelijk. Rigid-flex PCB's zijn uiteraard een combinatie van starre en flexibele materialen. Rigid-flex is in feite een hybride combinatie van materialen en processen van zowel starre als flexibele printen. De twee materiaaltypen worden in het algemeen afzonderlijk verwerkt en later met elkaar verbonden tijdens het fabricageproces. De stapeling van lagen varieert meestal enorm over de print (**figuur 1**). Er kunnen rigid-flex gebieden zijn en ook verschillende combinaties van alleen star en flexibel enzovoort. Er bestaat ook verstevigd flex, waar kaal FR4 of ander star materiaal selectief wordt verbonden met flexibele substraten om ze star te maken. Het starre verstevigingsmateriaal heeft zelden geleiders.

Toepassingen van starre printen versus flex en rigid-flex

Starre printen zijn een fundamentele technologie in hedendaagse elektronische producten. Starre printen bieden mechanische integriteit, elektrische verbindingen en betrouwbaarheid, maar worden beperkt door hun tweedimensionale vorm. De vlakheid beperkt ontwerpers tot twee dimensies, wat de ontwerpflexibiliteit sterk beperkt, vooral als elektronische apparaten steeds kleiner worden. Flexibele printen worden gebogen om te profiteren van een driedimensionale ruimte, terwijl er toch componenten op zitten. Flexibele printen maken optimaal gebruik van de ruimte in de behuizing van elektronica mogelijk, maar daar zijn wel grotere kosten mee verbonden dan bij traditionele PCB's.



Figuur 2. Rigid-Flex DFM-analyse die momenteel beschikbaar is in DFMStream van DownStream.

Starre en flexibele printen zitten in veel elektronische producten. Maar sommige toepassingen hebben meer voordeel van één type PCB. Starre printen zijn op hun plaats in producten zoals televisies, desktop-PC's, Blu-ray-spelers en andere grote elektronische producten. Flexibele printen zijn te vinden in smartphones, smartwatches, tablets, camera's, printers en laptops. Ze zijn essentieel voor medische implantaten zoals pacemakers, hoor-implantaten en ICD's. Ingewikkelde assemblages met meerdere, onderling met draden of kabels verbonden printen, worden vaak opnieuw ontworpen met rigid-flex-PCB's om de bedrijfszekerheid te verbeteren en te besparen op gewicht en ruimte. Dit werkt als katalysator voor veel militaire en luchtvaartproducten die worden ontworpen met rigid-flex. Een voorbeeld is een slimme kogel die zijn baan kan veranderen als het doel beweegt.

De introductie van kleine SMD-halfgeleiders heeft geleid tot een revolutie van geminiaturiseerde nieuwe behuizingen. Vergelijk maar eens de Sony Walkman met een moderne boom box. Jarenlang werden flexibele printen alleen gebruikt om meeraderige kabels te vervangen. Iedereen kan zich nog wel herinneren hoe de kop van een matrixprinter werd aangesloten met een flatcable. De kop ging heen-en-weer over het papier en de kabel paste zich dynamisch aan voor het verbinden van de kop met het moederbord. De introductie van rigid-flex is niet zo'n game-changer als die van SMD-componenten, omdat het toepassingsgebied beperkt is en ook de kosten een rol spelen. We hoeven niet te rekenen op een nieuwe generatie van desktop-PC's met rigid-flex-moederborden om de kosten te drukken. Maar geminiaturiseerde betrouwbare technologie zoals pil-camera's, opvouwbare telefoons of implantaten kunnen niet bestaan zonder rigid-flex-technologie.

Conclusie

Ontwerpers en fabrikanten hebben zich tot nu toe goed gered met beperkte toegang tot flex-specifieke DFM-analysetools. Maar flex en rigid-flex zijn intussen steeds meer gemeengoed geworden en de onderliggende technologie ontwikkelt zich voortdurend. Net als bij alle andere nieuwe technologieën, lopen de printontwerp en -analysetools daar achteraan. PCB-CAD-tools ondersteunen nu het ontwerp voor flex en rigid-flex, maar vaak ontbreekt nog de ondersteuning voor het doorgeven van de gegevens naar fabrikanten. Ook de meeste DFM-tools zijn nog onvoldoende geschikt voor het analyseren van fabricageproblemen bij flex- en rigid-flex-ontwerpen. Bij DownStream hebben we gelukkig een groot aantal gebruikers, die zich volledig op flex-ontwerpen hebben gestort en met ons samenwerken bij het ontwikkelen van een geschikte DFM-oplossing. We blijven met deze klanten werken om onze mogelijkheden voor DFM-analyse te verbeteren. Naast de ondersteuning van DFM-analyse die we in dit artikel beschrijven, zijn we onder meer van plan om de mogelijkheid toe te voegen de kans op breuken, zoals I-beaming, te analyseren en de 3D-visualisatie en DFM voor flex en rigid-flex in gebogen toestand te verbeteren (**figuur 2**). Dit zijn slechts enkele voorbeelden. Net als de onderliggende technologie moeten printontwerp en -analysetools zich permanent ontwikkelen om klantsucces te garanderen. Dat is een hoeksteen van DownStream's toewijding aan onze industrie.

230590-03

Installeren van een SMT-productielijn

Een bijdrage van Opulo

Opulo

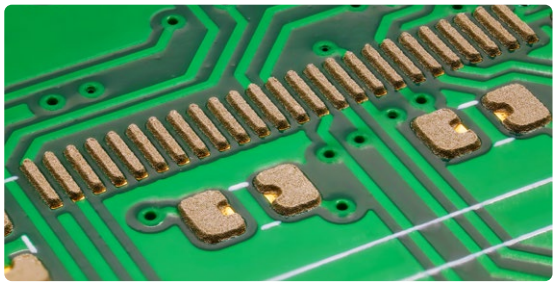
Het produceren van je elektronische ontwerpen is een uitdagende taak. Op zeer kleine schaal kunnen het gebruik van pincetten en het handmatig plaatsen van componenten op een van soldeerpasta voorziene print wel werken, maar bij meer is dan een paar dozijn printen wordt dit ondoenlijk. Als je honderdduizenden stuks per jaar produceert, kan het inhuren van een fabriek om alle assemblage, programmering en kwaliteitscontrole te doen een goede oplossing zijn. Maar wat als je ergens tussenin zit? We moeten dan tussen twee kwaden kiezen: inefficiënte handmatige assemblage of duur uitbesteden.
Maar nu kun je een SMT-productielijn gebruiken voor grotere aantallen printen terwijl je geld bespaart op de overhead van een dure contractfabrikant en de kwaliteit verzekert door de productie in eigen huis te houden. In dit artikel laten we je zien hoe je je eigen SMT-lijn kunt opzetten en bedienen voor de fabricage van je product.

Soldeerpasta en stencils

De eerste stap bij SMT-productie is het aanbrengen van soldeerpasta. Dit is het proces waarbij een rakel wordt gebruikt om pasta over een roestvrijstalen stencil op je PCB te strijken, waardoor er alleen pasta terechtkomt waar de componenten die nodig hebben (**figuur 1**). Om soldeerpasta met goed gevolg aan te brengen moeten drie factoren in orde zijn.

Pasta aanbrengen

Het kiezen van de juiste pasta voor je print kan een wereld van verschil betekenen voor het slagingspercentage van je productielijn. Een goede pasta is gemakkelijk aan te brengen en vloeit netjes zonder losse soldeerdruppeltjes. Chipquick SMDLTLFP250T3 is een heel goede pasta voor lage temperatuur die heel gemakkelijk verwerkt kan worden. Het kan ook heel geschikt zijn voor reflow-ovens die moeite hebben om de standaard 250 °C piek-reflowtemperatuur te halen. Als je reflow-oven echter gemakkelijk die 250 °C kan halen, is Loctite GC10 een uitstekende pasta-keuze. Die is extreem lang houdbaar en vloeit schoon met zeer weinig kans op soldeerbruggen of koude soldeerlassen.



Figuur 1. LumenPnP print met soldeerpasta.

Stencil

Om soldeerpasta alleen aan te brengen waar de componenten op je print die nodig hebben, heb je ook een stencil nodig. Dit zijn dunne bladen roestvrijstaal die met een laser voorzien zijn van gaten die precies op de pads van je print passen, zodat een rakel alleen pasta op de juiste plek deponeert. Die stencils kun je meestal voor een zeer redelijke prijs op maat laten maken bij je printleverancier.
De meeste printleveranciers bieden elektropolijsten van het stencil aan ter afwerking; we hebben gemerkt dat dit resulteert in een langere levensduur van het stencil en een schoner opbrengen van de pasta. Je kunt er ook voor kiezen om je stencil in een frame te laten monteren: het stalen stencil zit dan strak in een aluminium frame voor gebruik in een stencilprinter.

Stencilprinter

Een soldeerpasta-printer is een hulpmiddel dat het stencil perfect uitlijnt met je print – op een reproduceerbare manier. Het bereiken van een nauwkeurige uitlijning van het stencil met je PCB is van essentieel belang. Iedere afwijking kan ertoe leiden dat pasta over aangrenzende pads wordt aangebracht, wat de kans op soldeerbruggen aanzienlijk vergroot. De soldeerpasta-stencilprinter model 3040 is een betrouwbare en betaalbare keuze, die na installatie goed uitgelijnd blijft.

Plaatsing van componenten

Misschien wel het lastigste onderdeel van de productie van printen is het nauwkeurig plaatsen van de componenten op de kale print. En hoe lastiger hoe duurder: zelfs de goedkopere versies van pick&place-machines kunnen tienduizenden dollars kosten en vereisen een industriële omgeving met een persluchtinstallatie om te kunnen werken.

De LumenPnP (**figuur 2**) [1] is echter een desktop pick&place-machine waarmee je printen voor een fractie van de kosten in iedere omgeving kunt bestukken. De LumenPnP ondersteunt componenten tot 0402, en heeft zelfs gemotoriseerde feeders die de machine constant van te plaatsen onderdelen voorzien, wat betekent dat het assemblageproces volledig geautomatiseerd is. Na de installatie is het slechts een kwestie van de van soldeerpasta voorziene print monteren en de assemblage starten.

De machine is uitermate configureerbaar en kan ook ingewikkelde printen met bijzondere vereisten aan. De machine ondersteunt tot 50 gemotoriseerde feeders, met ruimte voor een paar dozijn strip-feeders, wat inhoudt dat zelfs een print met veel éénmaal voorkomende componenten in slechts één doorloop kan worden geassembleerd. En ook zeer grote printen kunnen worden bestukt: de LumenPnP kan boards assembleren met afmetingen tot 360 mm × 270 mm. De LumenPnP is volledig open source, wat inhoudt dat je de machine onbeperkt kunt aanpassen, begrijpen en onderhouden. Er is ook een grote community die constant werkt aan upgrades, modificaties en verbeteringen van de machine.

Reflow

Nu de print van soldeerpasta en alle onderdelen is voorzien, heb je een reflow-oven nodig om de soldeerpasta te verwarmen en deze te laten smelten tot vloeibaar soldeer. Dit verwarmingsproces moet een specifiek temperatuurprofiel volgen dat is geoptimaliseerd voor het gekozen soldeertype.

Reflow Master Pro

Deze hardwaremodule verandert een standaard pizza-oven in een reflow-oven. Met een fantastische gebruikersinterface en uitstekende prestaties is de Reflow Master Pro wat Opulo gebruikt voor alle print-assemblages. Je moet zelf voor een pizza-oven zorgen en de module zelf installeren, maar de resultaten zijn de moeite waard.

WEBLINKS

[1] LumenPnP: https://opulo.io/products/lumenpnp
[2] "Open Hardware Manufacturing Podcast": http://shows.acast.com/ohm-podcast

Whizoo Controleo3

Whizoo biedt een kant-en-klare oplossing voor iedereen die gewoon een gebruiksklare reflow-oven wil kopen. Hij is aanzienlijk duurder dan andere opties, maar al het montagewerk is voor je gedaan. De Controleo3 wordt ook geleverd met een mechanisme om de hete lucht uit de reflow-kamer af te voeren nadat het proces is voltooid, wat helpt om de afkoelperiode van het temperatuurprofiel nauwkeuriger te volgen.

Figuur 2. LumenPnP 3.1 met gemotoriseerde feeders.

Testen

Na het reflow-proces is het cruciaal om je PCB te testen. Hiervoor bestaat geen standaardoplossing, aangezien dit sterk afhankelijk is van je ontwerp, maar er bestaan enkele tools die kunnen helpen om de voltooide printen snel en nauwkeurig te testen.

Hoewel deze aan je product moet worden aangepast, kan een kant-en-klare testmal een uitstekend uitgangspunt vormen bij het opzetten van een testoplossing. Deze testmallen ('fixtures') hebben een lade waarin de te testen print kan worden gemonteerd, en een plaat die naar beneden kan bewegen zodat de print in contact komt met een reeks veerdruk-testpennen die de elektrische eigenschappen controleren.

Deze testpennen moeten contact maken met speciale testpunten op de print, dus je moet hier bij het ontwerpen van de schakeling al rekening mee houden. Natuurlijk is dit slechts een mechanische interface met je product; je moet nog steeds de hard- en software ontwikkelen die de tests daadwerkelijk uitvoert.

Een functionele test kan echter sneller en gemakkelijker worden geïmplementeerd dan een testmal met verende testpennen. Een functionele test houdt in dat je het product daadwerkelijk gebruikt zoals het bedoeld is om te worden gebruikt, bijvoorbeeld door motoren op je print aan te sluiten en te controleren of ze correct bewegen. De tests die je uitvoert zijn natuurlijk afhankelijk van je product en de aantallen die getest moeten worden.

Conclusie

Met de oplossingen voor alle besproken thema's ben je goed op weg om een op maat gesneden SMT-assemblagelijn te installeren. De voordelen van in-house assemblage zijn aanzienlijk en bevrijden je (bij lagere kosten) van de eisen die grotere bedrijven voor grote bestellingen stellen.

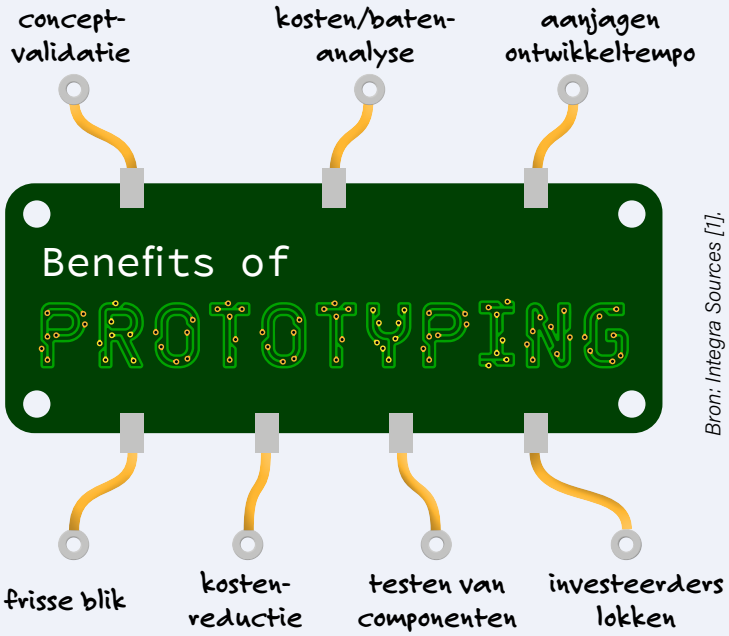
Om nog meer over hardwareproductie te ervaren, kun je luisteren naar "The Open Hardware Manufacturing Podcast" [2], waarin we de beste praktijken bespreken voor het produceren van je hardware, en mensen in de open hardware industrie interviewen om te zien hoe ze moeilijke productieproblemen oplossen.

230593-03

Prototyping: voor- en nadelen?

De meeste elektronica-ingenieurs en -makers begrijpen het belang van prototyping. De voordelen zijn talrijk, maar er zijn ook risico's waarmee rekening moet worden gehouden.

Wat voor risico's? Als je in de vicieuze cirkel van eindeloos prototypes maken terecht komt, kan dat je ervan weerhouden het eindproduct te realiseren of je doel te bereiken. Het model kan in de toekomst voor uitdagingen komen te staan, zoals fabricagefouten, hoge kosten of zelfs "de markt heeft er geen behoefte aan" [2]. Bovendien bestaat het risico dat je het eindproduct niet als eerste op de markt brengt. Het is essentieel om de juiste balans te vinden. En vergeet niet: je kunt altijd chatten met andere ingenieurs en makers via het Elektor Labs-platform (*elektormagazine.com/labs*) terwijl je aan je prototypes werkt!



Bron: Integra Sources [1].

Stappen voor het prototypen van een fysiek product

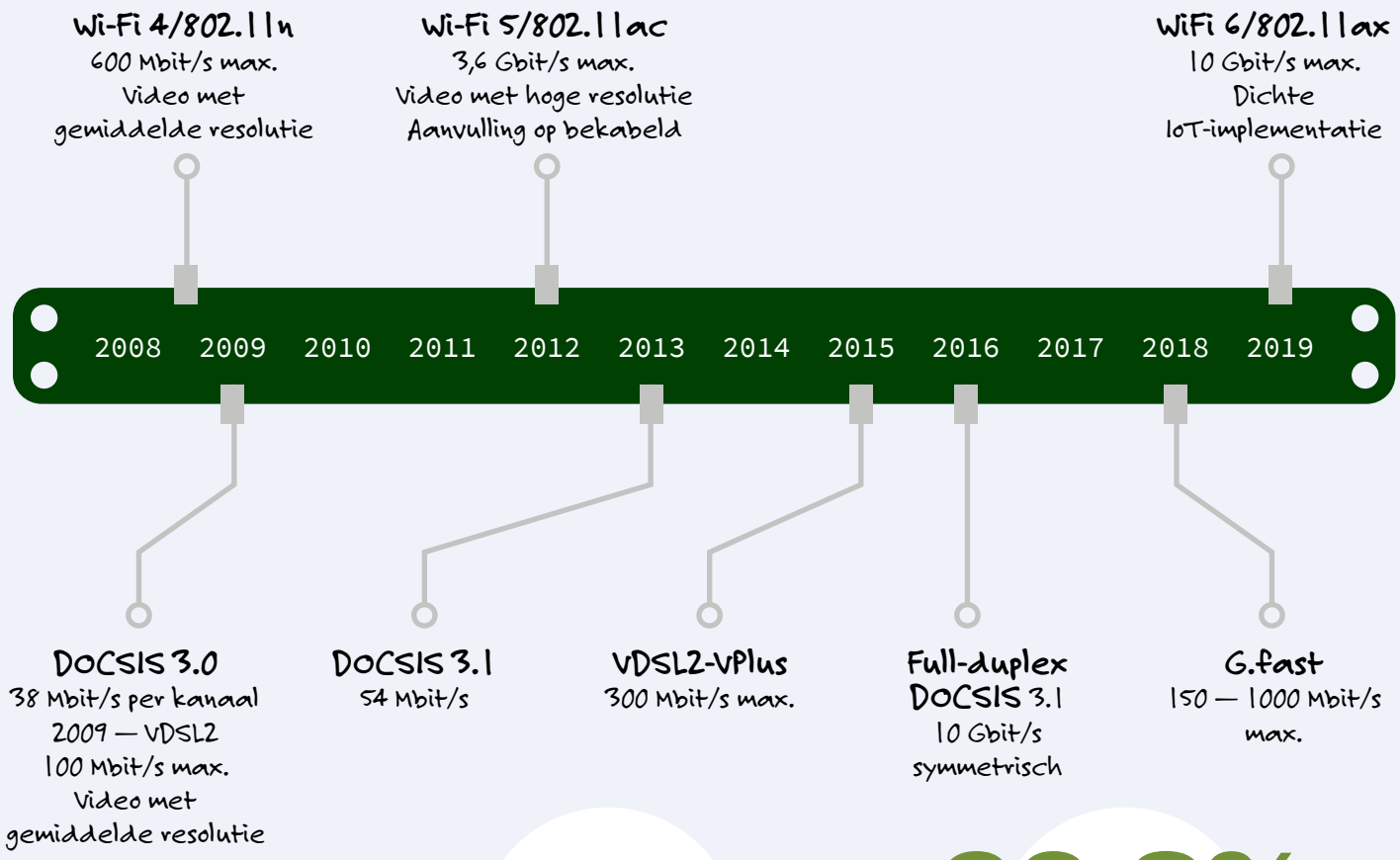
Bron: The Engineering Projects [3]

Dankzij 3D-printen kunnen bedrijven en individuele ontwerpers in enkele uren of dagen prototypes maken. Dit kan de doorlooptijd verkorten en de productontwikkeling versnellen.

51%

Het percentage engineering- en productiebedrijven dat 3D-printen gebruikt voor het produceren van prototypes en testonderdelen [4].

De onwikkeling van bedrade en draadloze technologie



27,4%

Het percentage WLAN-endnodes met WiFi 6/802.11ax in 2023.

66,8%

Het percentage WLAN-endnodes dat zal worden uitgerust met WiFi 5/802.11ac [5].

WEBLINKS

[1] Integra Sources, "What Makes Electronics Prototyping so Important for Successful Product Development?," 2022: https://tinyurl.com/integraproto
[2] European Comission, "No market need — Final evaluation report," 2017 [PDF]: https://tinyurl.com/nomarketneed
[3] The Engineering Projects, "What is Prototyping?," 2021: https://tinyurl.com/whatisprototyping
[4] Gitnux, "The Most Surprising 3D Printing Statistics And Trends in 2023," 2023: https://tinyurl.com/3dprintstats
[5] Cisco Annual Internet Report, 2018–2023, White Paper: https://tinyurl.com/cisconetreport

Figuur 1. De Genius 2 van wheel.me.

Een revolutie voor de industrie

de opkomst van autonome mobiele robots

Een bijdrage van wheel.me

In het voortdurend veranderende technologielandschap is er één innovatie die opvalt door zijn transformerende potentieel in veel industrieën: autonome mobiele robots (AMR's). Deze intelligente machines, uitgerust met geavanceerde sensoren, navigatiesystemen en kunstmatige intelligentie, veranderen de manier waarop we taken en processen in verschillende sectoren benaderen. We verkennen de fascinerende wereld van AMR's, hun technologische landschap en praktische toepassingen in de productie, logistiek, gezondheidszorg en nog veel meer.

Figuur 2. Automatiseer bedrijfsprocessen met flexibele AMR's

Autonome mobiele robots (AMR's) bestaan uit geavanceerde technologieën, die autonoom navigeren binnen vooraf gedefinieerde omgevingen. Sensoren leveren real-time informatie over de omgeving en zorgen voor obstakeldetectie en veilige navigatie. Geavanceerde navigatiesystemen maken gebruik van deze sensorische gegevens om kaarten van de omgeving te maken en voortdurend bij te werken, zodat ze nauwkeurig kunnen navigeren en zich kunnen aanpassen aan dynamische omstandigheden. En kunstmatige intelligentie (AI) fungeert als een cognitieve motor, waardoor AMR's efficiënter worden doordat ze kunnen leren van ervaringen, routes kunnen optimaliseren en zich kunnen aanpassen aan steeds veranderende omstandigheden. De combinatie van deze technologien maakt AMR's volledig autonoom en veelzijdig, waardoor ze in verschillende industriën ingezet worden.

AMR's in de productie

AMR's transformeren productielijnen. Ze kunnen geintegreerd worden in bestaande productieprocessen om materialen te transporteren, componenten te leveren en taken nauwkeurig en efficiënt uitvoeren. Voordelen zijn onder andere verhoogde efficiëntie, flexibiliteit en kostenbesparingen (**figuur 2**).

Figuur 3. Verander alles in een AMR met wheel.me.

AMR's in de logistiek en opslag

De logistiek en goederenopslag hebben AMR's ook omarmd. In grote magazijnen stroomlijnen deze robots de activiteiten door goederen efficiënt te verplaatsen, orders te verzamelen en voorraden te beheren. AMR's kunnen naast werknemers functioneren, waardoor de productiviteit toeneemt en het risico op letsel op de werkplek afneemt. De belangrijkste voordelen hier zijn geoptimaliseerde orderverwerking, voorraadbeheer en schaalbaarheid.

AMR's in de gezondheidszorg

In de gezondheidszorg worden AMR's gebruikt voor taken als medicijnbezorging, patiëntenzorg en het desinfecteren van ziekenhuiskamers. Hun precisie, betrouwbaarheid en vermogen om autonoom te werken maken ze tot essentiële hulpmiddelen in moderne zorginstellingen. Toepassingen in de gezondheidszorg zijn onder andere het leveren van medicatie, patiëntenassistentie en infectiecontrole.

Uitdagingen en toekomstige trends

Hoewel het potentieel van AMR's onmiskenbaar is, moeten er verschillende uitdagingen worden aangepakt voordat ze op grote schaal kunnen worden toegepast. Deze omvatten integratie in bestaande processen, het waarborgen van de veiligheid en het drukken van de kosten. Vooruitkijkend kunnen we anticiperen op AI-ontwikkelingen, meer samenwerking tussen AMR's en een bredere toepassing naarmate de technologie zich verder ontwikkelt en de kosten verder dalen. AMR's bevinden zich in de voorhoede van de automatisering en zijn klaar om industrieën voorgoed te transformeren. Het aanpassingsvermogen en de efficiëntie van AMR's maken ze onmisbare hulpmiddelen voor moderne bedrijven. wheel.me versnelt dit process met een technologie die vrijwel alle objecten kann transformeren in een AMR (**figuur 3**). Deze innovatieve aanpak biedt eindeloze flexibiliteit, waardoor bedrijven bestaande apparatuur, zoals karren of trolleys, kunnen omvormen tot autonome systemen. Deze flexibiliteit bespaart investeringen. Daarnaast geeft de democratische prijsstelling van wheel.me toegang tot geavanceerde automatiseringstechnologie aan een breder scala aan bedrijven. Bovendien zorgen de snelle implementatiemogelijkheden ervoor dat bedrijven AMR-oplossingen snel kunnen implementeren, waardoor ze binnen enkele weken efficiëntieverbeteringen en kostenbesparingen kunnen realiseren in plaats van binnen enkele maanden. In wezen biedt de technologie van wheel.me een drietal voordelen: aanpasbaarheid, betaalbaarheid en flexibiliteit, waardoor automatisering een haalbare en transformerende optie wordt voor industrieën van elke omvang. Naarmate de technologie zich verder ontwikkelt en de barrières voor ingebruikname worden overwonnen, kunnen we verwachten dat deze robots een nog belangrijkere rol gaan spelen in het verhogen van de efficiëntie, het verlagen van de kosten en het verbeteren van de veiligheid in diverse sectoren. Het tijdperk van AMR's is aangebroken en belooft een toekomst waarin automatisering veelbelovend is.

230606-03

WEBLINK

[1] wheel.me: https://wheel.me

Gemaakt voor grote uitdagingen

Rohde & Schwarz voegt achtkanaals R&S MXO 5 toe aan volgende generatie oscilloscopen

Een bijdrage van Rohde & Schwarz

Met de gloednieuwe R&S MXO 5 blijft Rohde & Schwarz zijn serie next-generation oscilloscopen verder ontwikkelen. Deze serie begon in 2022 met de succesvolle R&S MXO 4. Met de introductie van de R&S MXO 5, de eerste achtkanaals oscilloscoop, bouwt de firma verder op de industrieprimeur van de R&S MXO 4. De R&S MXO 5 zal ingenieurs in staat stellen om meer veeleisende ontwerpuitdagingen aan te gaan!

Figuur 1. De R&S MXO 5 is de next-generation oscilloscoop van Rohde & Schwarz, ontwikkeld voor grotere uitdagingen.

Figuur 2. Een blik in het inwendige onthult een op maat gemaakte 200 Gbit/s ASIC: de MXO-EP met veel signaalverwerkingskracht.

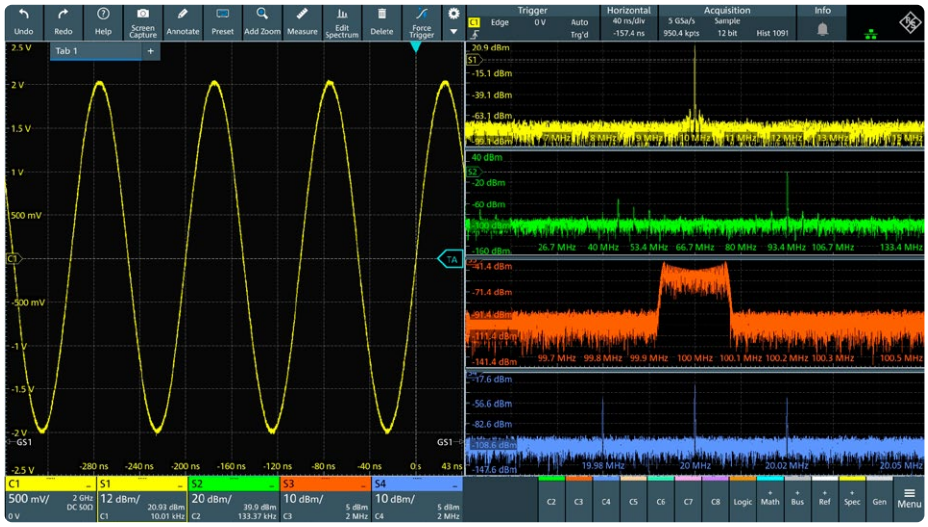
Rohde & Schwarz presenteert zijn nieuwe R&S MXO 5-oscilloscopen (**figuur 1**), beschikbaar in modellen met vier- of acht kanalen. Voortbouwend op de next-generation MXO-EP processing ASIC-technologie (**figuur 2**), ontwikkeld door Rohde & Schwarz en geïntroduceerd met de R&S MXO 4, tillen de nieuwe acht-kanaals R&S MXO 5-oscilloscopen de meetprestaties naar een hoger niveau.

Industrieprimeur in een achtkanaals oscilloscoop

De nieuwe R&S MXO 5 toont meer signaaleigenschappen in zowel tijd- als frequentiedomein dan welke andere oscilloscoop dan ook. De R&S MXO 5 is 's werelds eerste achtkanaals oscilloscoop met 4,5 miljoen acquisities per seconde en 18 miljoen golfvormen per seconde over meerdere kanalen. Ingenieurs kunnen ingewikkelde signaaldetails en sporadische gebeurtenissen met uitzonderlijke precisie vastleggen. De R&S MXO 5 heeft digitale triggering op alle acht kanalen, uniek in dit product segment, voor nauwkeurige detectie van de kleinste signaalafwijkingen. De baanbrekende capaciteit van 45.000 FFT's per seconde biedt ingenieurs ongeëvenaarde spectrumweergave, met name voor EMI het testen van harmonischen.

Door tot 99% van de real-time signaalactiviteit vast te leggen met s'werelds snelste sampling-rate, versnelt de R&S MXO 5 de signaalanalyse terwijl sporadische en willekeurige gebeurtenissen worden gedetecteerd die door de meeste andere oscilloscopen worden gemist. Met deze functies kunnen ingenieurs efficiënter ontwerpen debuggen in verschillende toepassingen – van vermogensomzetting tot automotive elektronica analyse – waardoor vermogens- en signaalintegriteitsmetingen en debuggen van logica en busprotocollen een fluitje van een cent worden.

Philip Diegmann, vice-president Oscilloscopen bij Rohde & Schwarz, zegt: "De lancering van de R&S MXO 4 in 2022 introduceerde nieuwe generatie oscilloscopen met ongeëvenaarde prestaties en toegevoegde waarde. Bij Rohde & Schwarz blijven we de bruikbaarheid van onze oscilloscopen naar hogere niveaus tillen. We zijn dan ook zeer verheugd om nu de R&S MXO 5 te introduceren, een voortzetting van onze traditie van uitmuntende oscilloscopen. Voortbouwend op dezelfde technische doorbraken, is deze oscilloscoopserie zorgvuldig ontworpen door ons toegewijde ontwikkelingsteam om zowel het grote plaatje als de kleinste details van elektrische signalen vast te leggen met ongeëvenaarde nauwkeurigheid en snelheid. De 'scopen zijn ontwikkeld voor meer uitdagingen en zullen het doorgronden en testen van hun elektronische systemen door onze klanten versnellen."



Figuur 3. Een normale sinus kan veel spectrale elementen verbergen. De vier simultane spectra kunnen op verschillende afstanden en bereiken worden ingesteld om verschillende frequentiedetails te onderzoeken.

Het diepste standaardgeheugen in zijn klasse

De R&S MXO 5-serie biedt standaard een simultaan acquisitiegeheugen van 500 Msamples voor alle acht kanalen, het dubbele van het standaardgeheugen van de concurrentie. De ruime opslag kan worden gebruikt voor uitgebreide gegevensverzameling. Bovendien kan een optie voor geheugenuitbreiding de opnamelengte verdubbelen tot 1 Gsamples voor de meest veeleisende toepassingen. De uitzonderlijke geheugendiepte in de R&S MXO 5-oscilloscoop is van cruciaal belang voor een breed scala aan troubleshooting-taken, waardoor het mogelijk is om langere perioden vast te leggen en nauwkeurige bandbreedte-informatie te behouden, zelfs langere tijdbasis instellingen.

Eerste digitale trigger voor acht kanalen

Als eerste achtkanaals oscilloscoop met digitale triggering zet de R&S MXO 5 een nieuwe standaard in signaalanalyse. De digitale trigger overtreft alle andere oscilloscoop-triggers met een opmerkelijke gevoeligheid van 0,0001 div. De gevoeligheid helpt bij het nauwkeurig isoleren van kleine signaalafwijkingen in de fysieke laag, zelfs in aanwezigheid van sterke signalen. Geen enkel ander instrument op de markt kan deze gevoeligheid evenaren. Andere instrumenten hebben vaak signaalbewerkingscorrecties nodig om analoge triggergebeurtenissen gelijktijdig te tonen, wat resulteert in een minder nauwkeurige triggerprestatie. De digitale trigger vult naadloos de 18-bit verticale architectuur in de oscilloscopen aan, zodat ingenieurs de precisie van de R&S MXO 5 volledig kunnen benutten.

Superieure RF-metingen

De R&S MXO 5 blinkt uit in RF-metingen, zowel in het tijd- als in het frequentiedomein. Het is de eerste oscilloscoop met 45.000 FFT's (Fast Fourier Transforms) per seconde. De uitzonderlijke snelheid, gecombineerd met de mogelijkheid om gelijktijdig vier verschillende tijdsafhankelijke spectra weer te geven, biedt ingenieurs een uitstekende zichtbaarheid van RF-signalen, ongeëvenaard in zijn klasse (**figuur 3**). De geavanceerde mogelijkheden zijn standaard R&S MXO 5-functies.

Geavanceerde gebruikerservaring

Een uitzonderlijk groot 15,6" full-HD capacitief touchscreen en een intuïtieve gebruikersinterface optimaliseren de leercurve en geven R&S MXO 5-oscilloscopen een naadloze en unieke visuele ervaring. De kleine footprint en praktische VESA-montage maken de oscilloscopen ideaal voor elke technische opstelling (**figuur 4**). De R&S MXO 5 heeft een minimaal hoorbaar geluidsniveau, ideaal voor een labomgeving waar ingenieurs hun taken geconcentreerd en nauwkeurig kunnen uitvoeren.

Lage instapprijs

De R&S MXO 5-oscilloscopen zijn verkrijgbaar in vier- en achtkanaals modellen, met bandbreedtes van 100 MHz, 200 MHz, 350 MHz, 500 MHz, 1 GHz en 2 GHz. De prijzen van de achtkanaals-modellen beginnen al bij € 19.500 (excl. BTW), de laagste instapprijs in deze klasse. Er zijn diverse upgrade-opties beschikbaar voor gebruikers met veeleisende behoeften, zoals 16 digitale kanalen met een MSO-optie (mixed-signal oscilloscope), een geïntegreerde tweekanaals 100 MHz willekeurige golfvormgenerator, protocoldecodering en triggeropties voor industriestandaard serieële bussen en een frequentierespons-analyzer om de mogelijkheden van het instrument uit te breiden.

De nieuwe R&S MXO 5-serie oscilloscopen zijn nu verkrijgbaar bij Rohde & Schwarz en geselecteerde distributiepartners.

230607-03

Rohde & Schwarz zal de nieuwe R&S MXO 5-serie oscilloscopen demonsteren op Productronica 2023 in München in hal A1.375, van 14 tot 17 november 2023.

Figuur 4. VESA-bevestiging maakt de R&S MXO 5-oscilloscopen ideaal voor elke technische werkruimte.

WEBLINK

[1] R&S MXO 5: https://www.rohde-schwarz.com/product/MXO5

Alle begin...

...versterkt verschillen

Eric Bogers (Elektor)

De vorige aflevering is besloten met een korte bespreking van de constante-stroombron en de vraag waarom we in vredesnaam een stroombron nodig zouden hebben die een constante stroom door een variërende belasting stuurt. En het antwoord hebben we toen meteen gegeven: zonder zo'n stroombron zou de verschilversterker niet kunnen bestaan.

De verschilversterker

De verschilversterker is de basisschakeling van elke operationele versterker (opamp). Een verschilversterker heeft twee ingangen: een inverterende ingang (IN–) en een niet-inverterende ingang (IN+). Hij versterkt het *verschil* tussen beide ingangen. Het schema is getekend in **figuur 1**.

De met R8 en R9 opgebouwde spanningdeler levert een spanning die ongeveer 2,7 V boven de negatieve voedingsspanning ligt; de spanning over R7 bedraagt zodoende ongeveer 2 V, resulterend in een stroom van 2 mA – T3 werkt als constante-stroombron.

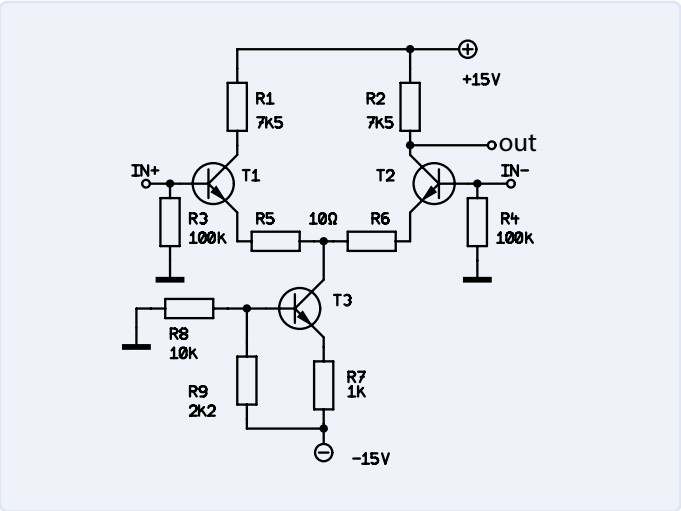
Wanneer op beide ingangen van de verschilversterker dezelfde spanning staat, dan wordt deze stroom van 2 mA netjes verdeeld over de beide 'bovenste' transistoren (elk 1 mA). Zowel over R1 als over R2 staat dan een spanning van 7,5 V.

Nu zetten we op de niet-inverterende ingang (IN+) een spanning van een paar millivolt, zodat de stroom door T1 oploopt tot 1,5 mV. Omdat de constante-stroombron de totale stroom op een constante 2 mA houdt (dat is nu eenmaal de aard van het beestje), loopt er nu door T2 een stroom van 0,5 mA. Dat betekent dat er over R2 nog slechts een spanning van 3,75 V valt – de uitgangsspanning van de verschilversterker neemt dus met 3,75 V toe.

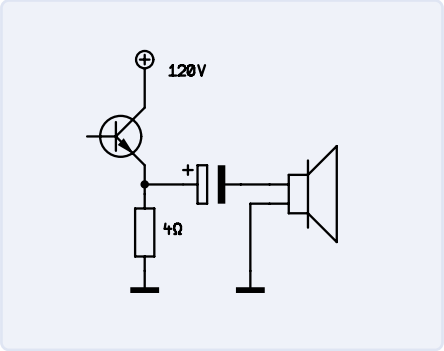
Als we de spanning op de inverterende ingang hadden gezet in plaats van op de niet-inverterende, dan was de stroom door T2 toegenomen in plaats van afgenomen, en zou de uitgangsspanning juist zijn afgenomen.

Wat gebeurt er nu wanneer een spanning op *beide* ingangen wordt gezet? Omdat door de beide transistoren dezelfde stroom loopt als de ingangen dezelfde spanning voeren, verandert de uitgangsspanning niet. Met andere woorden: een verschilversterker versterkt het *verschil* tussen de spanningen op de beide ingangen, en niet de som van die spanningen.

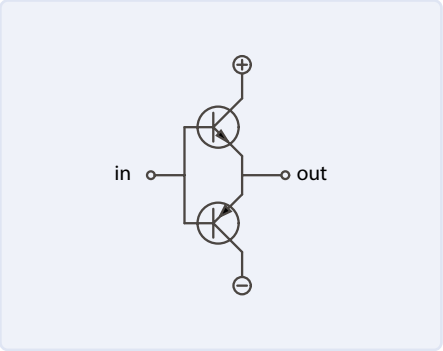
Een van de grootste voordelen van de verschilversterker is de grote temperatuurstabiliteit – zolang beide transistoren in gelijke mate opwarmen. Dat komt omdat de toename van de basis-emitterspanning ten gevolge van een temperatuurstijging bij beide transistore optreedt en deze elkaar dus compenseren.



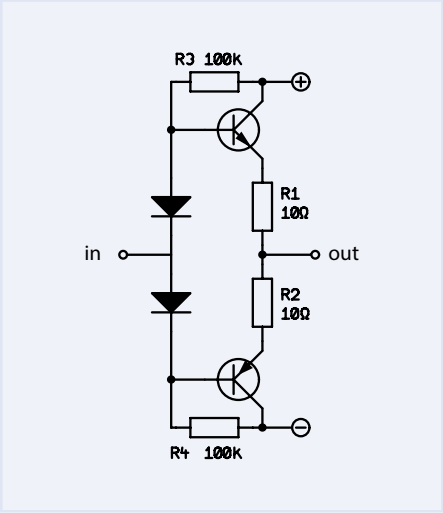
Figuur 1. De verschilversterker.



Figuur 2. Klasse-A uitgangstrap.



Figuur 3. De balanseindtrap.



Figuur 4. De klasse-B-versterker.

De klasse-A-versterker

Veronderstel eens dat we een vermogensversterker willen bouwen die 400 W levert in een belasting van 4 Ω. Daartoe gebruiken we (u raadt het al) een emittervolger - zie **figuur 2**.
In zo'n emittervolger kan de transistor de uitgangscondensator wel *op*laden maar niet *ont*laden – maar dat is iets dat beslist moet gebeuren om ook de negatieve perioden van de signaalwisselspanning te kunnen doorgeven. De condensator wordt in de praktijk daarom ontladen via de emitterweerstand, en die mag dan niet groter zijn dan de uitgangsimpedantie, hier dus ook 4 Ω.
(Voor de scherpslijpers onder de lezers: we laten hier geheel en al het feit buiten beschouwing dat een luidspreker geen ohmse weerstand is, maar een behoorlijk complexe constructie met een navenant complexe impedantie. Om ervoor te zorgen dat een luidspreker doet wat hij moet doen, dient de versterker een zo laag mogelijke uitgangsweerstand te bezitten zodat de membraan gedempt wordt. De verhouding van de belastingweerstand tot de uitgangsweerstand wordt de *dempingsfactor* genoemd, en die moet zo groot mogelijk zijn. Met een emitterweerstand van 4 Ω is echter geen geweldige dempingsfactor haalbaar; de waarde van die weerstand zou daarvoor veel kleiner moeten zijn. Maar laten we het niet ingewikkelder maken dan het al is...)
We berekenen de uitgangsspanning van de versterker als volgt:

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{400\ \text{W} \cdot 4\ \Omega} = 40\ \text{V}$$

Dit is de effectieve waarde. De topspanning is navenant groter, en omdat we (in dit voorbeeld) uit één voedingsspanning beide halve perioden moeten voeden, moeten we die waarde ook nog eens verdubbelen:

$$U_{\text{tt}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}} = 113{,}14\ \text{V}$$

Dat is we heel erg minimaal: we hebben ook nog een beetje speelruimte nodig omdat er over de transistor een geringe spanning valt, terwijl de spanning over de bufferelco gedurende een halve periode ook iets inzakt. Hiervoor nemen we (met de natte vinger) een paar volt extra, zodat we voor de voedingsspanning op 120 V uitkomen. (Voor de goede orde: we werken hier uitsluitend op papier, en maken ons geen zorgen of we in de praktijk een transistor zouden kunnen vinden die voor dit experiment geschikt zou zijn...)
We stellen het werkpunt van de transistor zo in dat over de emitterweerstand de helft van deze spanning valt. Dat betekent voor de dissipatie (het verliesvermogen) in zowel de emitterweerstand als in de transistor:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{(60\ \text{V})^2}{4\ \Omega} = 900\ \text{W}$$

Met andere woorden: ook wanneer de versterker helemaal geen vermogen aan de luidspreker levert, hebben we met een verliesvermogen van in totaal (schrik niet) 1800 W te maken. Het spreekt voor zich dat dit volkomen onacceptabel is.

De balanseindtrap – klasse-C-versterker

Door toepassing van twee transistoren die beurtelings telkens een halve periode van het ingangssignaal voor hun rekening nemen, kan het verliesvermogen aanzienlijk worden gereduceerd.
In de schakeling van **figuur 3** neemt de NPN-transistor de positieve halve signaalperioden voor zijn rekening, en de PNP-transistor de negatieve. Deze schakeling (die bekend staat als klasse-C-versterker) heeft echter een zeer groot nadeel: bij ingangsspanningen die beneden de doorlaatspanning van 0,7 V van de BE-overgang liggen, geleidt geen van beide transistoren, waardoor het signaal zeer sterk vervormd zal worden.

De klasse-B-versterker

Dit nadeel van de klasse-C-versterker kan eenvoudig worden omzeild door de basis van elke transistor een voorspanning (instelspanning of bias) te geven. In de schakeling van **figuur 4** worden hiervoor twee diodes gebruikt waarover telkens een spanning valt die gelijk is aan de doorlaatspanning van de transistor. Een

'echte' klasse-B-versterker heeft geen ruststroom – elke transistor geleidt slechts gedurende zijn 'eigen' halve periode van de sinaalwisselspanning.
Net boven de doorlaatspanning gedragen transistoren zich echter nog niet bijster lineair, waardoor alsnog vervorming wordt geïntroduceerd. Dit kan worden tegengegaan door de basis van elke transistor een tikje méér voorspanning te geven, zodat er een navenant kleine ruststroom loopt – bijvoorbeeld in de orde van grootte van 1% van de uitgangsstroom. In ons voorbeeld gingen we uit van een uitgangsstroom van 10 A, waaruit een ruststroom van ongeveer 100 mA zou volgen.
Die ruststroom wordt doorgaans verkregen door in serie met de beide dioden een instelpotmeter op te nemen; daarmee wordt de ruststroom op de gewenste waarde afgeregeld. De emitterweerstanden zijn van essentieel belang voor de temperatuurstabiliteit van de schakeling – wanneer de transistoren warm worden, neemt (bij gelijkblijvende U_{BE}) de basisstroom (en dus de collectorstroom) fors toe, waardoor de transistoren nog warmer worden en de stroom nog meer toeneemt – en zo vervolgens tot de transistoren uiteindelijk het loodje leggen. Daarom moeten de dioden en de eindtransistoren op hetzelfde koellichaam worden gemonteerd – zodat de doorlaatspanning van die dioden bij toename van de temperatuur afneemt; door middel van de emitterweerstanden wordt ervoor gezorgd dat U_{BE} lager wordt.
Emitterweerstanden zijn ook onmisbaar bij parallelschakeling van meerdere (eind)transistoren, zodat het verliesvermogen gelijkelijk over die halfgeleiders wordt verdeeld en een groter maximaal vermogel haalbaar is.
Over verliesvermogen gesproken: in rust (zonder signaal) wordt het verliesvermogen bepaald door de grootte van de ruststroom: voor één transistor geldt:

$$P = U \cdot I = 60\ \text{V} \cdot 0{,}1\ \text{A} = 6\ \text{W}$$

Dat is haast verwaarloosbaar vergeleken met wat er in een klasse-A-versterker wordt verstookt – zelfs wanneer we dit vermogen moeten verdubbelen omdat er twee transistoren aanwezig zijn. We kunnen het totale verliesvermogen gemakkelijk berekenen door het uitgangsvermogen af te trekken van het vermogen dat in de versterker wordt gepompt:

$$P_{in} = U \cdot I = 60\ \text{V} \cdot 10\ \text{A} = 600\ \text{W}$$

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} + P_{quiescent} = 600\ \text{W} - 400\ \text{W} + 12\ \text{W} = 212\ \text{W}$$

(Opmerking: bij de berekening van het ingangsvermogen is de spanning van 60 V – in plaats van 120 V – wel degelijk correct, omdat de twee transistoren elk slechts gedurende de helft van de tijd in geleiding zijn.)

Het bovenstaande rekenvoorbeeld doet helaas niet echt recht aan de praktijk, omdat we de voedingsspanning wel heel erg laag hebben gekozen. Het verschil tussen de voedingsspanning en de maximale uitgangsspanning bedraagt hier niet meer dan zo'n 3,6 V – het dubbele daarvan zou realistischer zijn als we de bufferelco's van de voeding tenminste niet krankzinloos groot willen maken. Hiermee rekening houdend zou het maximale verliesvermogen oplopen tot 248 W.
Wanneer we het hier hebben over 'maximaal verliesvermogen', dan geldt dat voor sinusvormige signalen. Het grootste verliesvermogen doet zich voor bij een blokgolf ter hoogte van de halve voedingsspanning op de uitgang. Het verliesvermogen kan dan oplopen tot 264 W, oftewel 6% meer.

230533-03

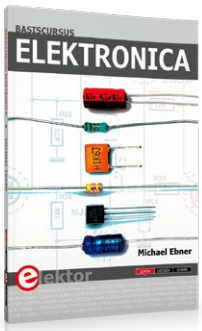
De artikelreeks "Alle begin..." is gebaseerd op het boek "Basiscursus elektronica" van Michael Ebner, dat bij Elektor is verschenen.

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.

Gerelateerd product

- **Michael Ebner,** *Basiscursus elektronica* **(e-boek, Elektor)**
  www.elektor.nl/18232



wheel.me Genius 2

wheel.me heeft 's werelds eerste autonome wiel uitgevonden dat alles moeiteloos in een autonome robot verandert.

Maximale flexibiliteit
Eindeloze gebruiksmogelijkheden, geen veranderingen in infrastructuur nodig

Robotics-as-a-Service
Alles-in-één pakket, geen hoge kosten vooraf, flexibele voorwaarden

Scherpe prijsstelling
Laag risico, lage prijs en onmiddellijk rendement op investering

Gemakkelijke navigatie
Dynamische obstakeldetectie, beweging in alle richtingen en focus op veiligheid

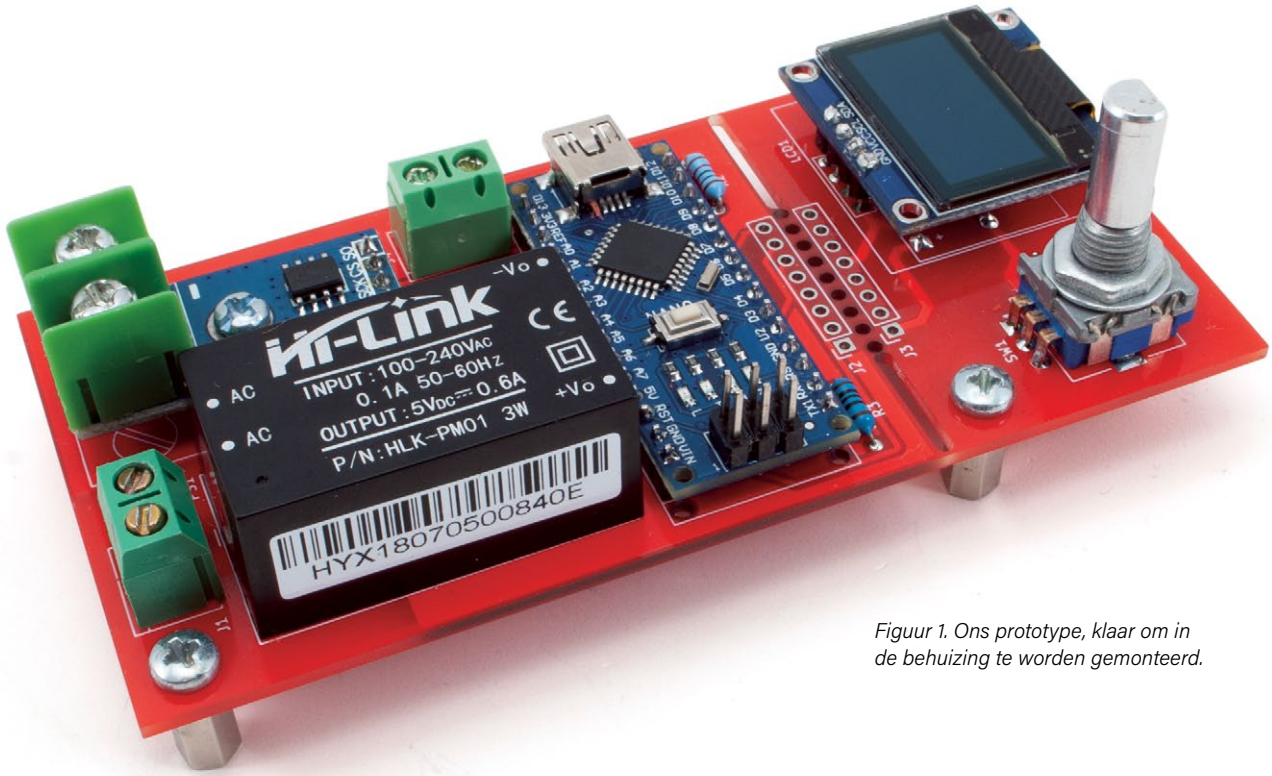
www.wheel.me

wheel_me

From Our Partners At
Elettronica In
ELETTRONICA APPLICATA
elettronicain.it

Mini-reflowplaat

voor assemblage of reparatie van kleine SMD-schakelingen



Figuur 1. Ons prototype, klaar om in de behuizing te worden gemonteerd.

Massimo Divito (Italië)

De overgang naar miniatuurcomponenten voor oppervlaktemontage betekende voor velen het begin van een reeks assemblageproblemen die overwonnen moesten worden. Naast de niet-zo-gemakkelijke plaatsing van componenten, moet men zich houden aan specifieke temperaturen en timing voor de soldeercyclus. Professionele reflow-soldeerstations zijn duur. In dit artikel presenteren we een effectieve maar redelijk betaalbare oplossing voor het assembleren/repareren van onze printen.

Vergeleken met conventionele THT-componenten (through-hole technology, dat zijn die componenten met aansluitdraden die door gaatjes in de print worden gestoken) kan het werken met SMT-componenten (surface-mount technology), ook wel SMD's genoemd, behoorlijk lastig zijn. Het vereist een scherp gezichtsvermogen, een zeer vaste hand, een soldeerbout met een geschikte punt en misschien wel het belangrijkst, veel geduld.

Als er veel SMD-componenten in een schakeling zitten en vooral als er 'veelbenige' IC's bij betrokken zijn, wordt de situatie ingewikkelder, vooral als er veel onderdelen dicht bij elkaar zitten; het gebruik van een soldeerbout kan in dit geval onpraktisch worden. Daarom hebben we een ontwerp bedacht dat aan je behoeften in dergelijke situaties kan voldoen: iets eenvoudigs en goedkoops dat gemakkelijk kan worden geïmplementeerd.

De soldeertechniek die op professioneel gebied wordt gebruikt voor SMD's heet reflow-solderen, waarvoor normaal gesproken ovens worden gebruikt. In plaats daarvan dachten we hier aan een verhitte plaat, geschikt voor kleinere schakelingen, die weinig ruimte inneemt in ons lab en die indien nodig ook gebruikt kan worden als voorverwarmer voor soldeer- en desoldeerbewerkingen met het heteluchtstation.

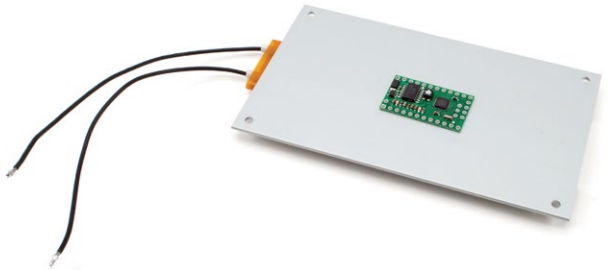
Reflow-solderen is een proces waarbij een soldeerpasta, bestaande uit tinpoeder en vloeibaar vloeimiddel, wordt gebruikt in plaats van de normale tin/loodlegering (of een loodvrij soldeer voor ROHS-conforme toepassingen) om componenten op de print te solderen.
Soldeerpasta wordt met een spuit of een speciaal sjabloon op de soldeereilandjes van de printplaat aangebracht, waarna alle elektronische componenten worden geplaatst en het geheel een gecontroleerde warmtebehandeling ondergaat, waardoor de soldeerpasta smelt en de componenten definitief worden gesoldeerd.

Hoe het werkt

Ons ontwerp bestaat uit een aluminium plaat met elektrische weerstanden die 230 V voeren en die de plaat verhitten; de print die gesoldeerd moet worden wordt op deze plaat gelegd. De weerstanden worden aangestuurd door een solid-state relais dat op zijn beurt wordt aangestuurd door een schakeling op basis van een Arduino Nano, zoals te zien op de volledig geassembleerde print in **figuur 1**. Op de schakeling is een K-type thermokoppel aangesloten dat met een schroefoog op de plaat is bevestigd en dat constant de temperatuur meet.
Het geheel wordt bediend met een draai-encoder waarmee tussen drie werkingsmodi kan worden gekozen: twee verschillende soldeerprofielen, een voor lood/tin-legeringen en een voor loodvrije legeringen, en een derde modus om de plaat in te stellen op een vaste temperatuur; deze functie is handig om bijvoorbeeld een geassembleerde print voor te verwarmen waaraan we met een heteluchtbout willen gaan werken. We hebben een klein OLED-display van 0,96 inch toegevoegd waarop we het profiel selecteren dat we willen starten en dat ons tijdens de reflowfasen de ingestelde temperatuur toont alsmede de temperatuur die de plaat heeft bereikt, plus de tijd die nog rest tot het proces is voltooid. Zoals we al hebben vermeld, is het voor een correcte uitvoering van het soldeerproces noodzakelijk om een exacte temperatuurcurve te volgen om de soldeerpasta goed te laten smelten en tegelijkertijd te voorkomen dat de componenten door te veel warmte worden beschadigd; in de regel specificeert elke fabrikant voor zijn eigen componenten de optimale curve.
Het hele proces is onderverdeeld in vier fasen:

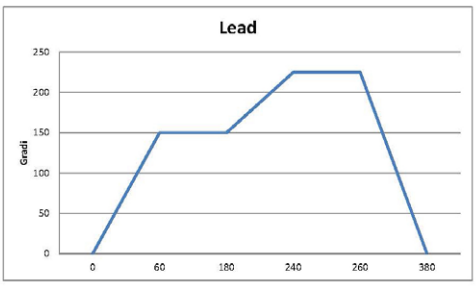
- voorverwarmen: de vluchtige ingrediënten van de soldeerpasta beginnen te verdampen;
- weken: vluchtige bestanddelen zijn volledig verdampt, de flux smelt en deoxideert de soldeereilandjes;
- reflow: het metalen deel van het soldeer smelt en creëert een permanente mechanische en elektrische verbinding tussen de componenten en de print. Het vloeimiddel verdampt;
- afkoeling: het tin koelt af en stolt.

Hiervoor moeten we op elk moment van het reflow-proces de temperatuur van plaat kennen. Aangezien de temperatuur van de plaat (**figuur 2**) ongeveer elke 250 ms wordt gemeten, moeten we voor een enkel profiel van 380 s 1520 temperatuurwaarden verwerken (380.000/250). Het opslaan van en toegang krijgen tot zoveel waarden wordt behoorlijk ingewikkeld op firmwareniveau en toekomstige wijzigingen zouden omslachtig zijn. Als we bovendien bedenken dat er in ons geval twee profielen zijn (maar we kunnen er meer toevoegen als we dat willen), verdubbelt het aantal waarden. Daarom hebben een andere oplossing bedacht, waarbij we slechts enkele temperaturen hoeven te definiëren en aan de hand daarvan de andere kunnen berekenen.
Als we kijken naar de grafieken van de profielen (**figuur 3**) zien we dat de temperatuur lineair veranderit, zowel naar boven als naar beneden. We kunnen dan elk profiel verdelen in verschillende segmenten, waarvan we alleen de begin- en eindwaarde hoeven te kennen. Elk segment wordt gedefinieerd door twee paren waarden die het begin en het einde aangeven, en elk paar bestaat op zijn beurt uit de tijd (seconden) en de temperatuur; deze waarden kunnen eenvoudig worden opgeslagen in een tweedimensionale matrix van uit zes elementen: de zes punten die het profiel exact beschrijven.
Als we dus de temperatuur willen weten die de plaat op een bepaald moment moet hebben, hoeven we slechts lineair te interpoleren om een onbekende waarde tussen twee bekende waarden te berekenen. Als we weten welke temperatuurwaarde de plaat zou moeten

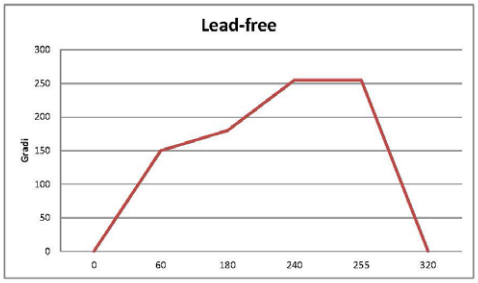


Figuur 2. Een print wordt op de reflowplaat geplaatst nadat de soldeereilandjes van soldeerpasta zijn voorzien en de onderdelen zijn geplaatst.

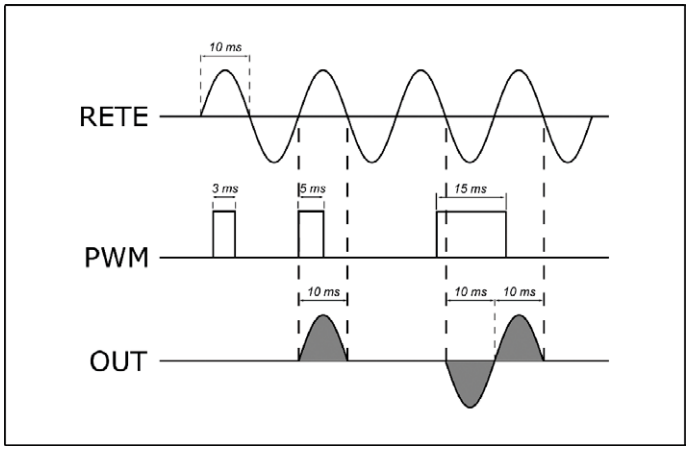
Lead	
time (s)	Deg. (°C)
0	0
60	150
180	150
240	225
260	225
380	0



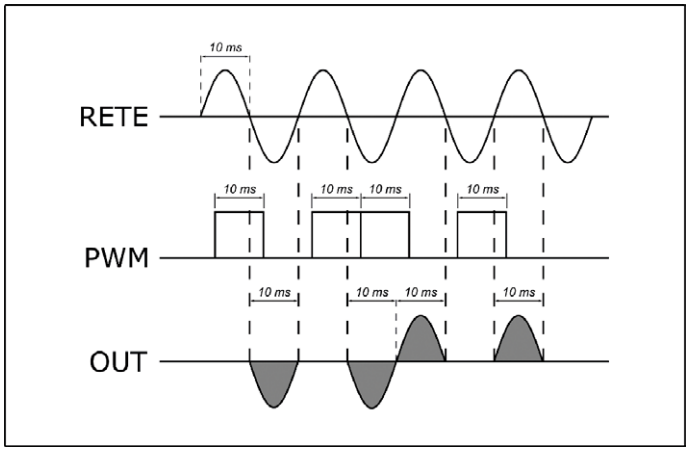
Lead-free	
time (s)	Deg. (°C)
0	0
60	150
180	180
240	255
255	255
320	0



Figuur 3. Temperatuurprofielen voor solderen met loodhoudende en loodvrije legeringen.



Figuur 4. Werkingsprincipe van de PWM-gestuurde nuldoorgang-triggering (RETE = netspanning).



Afbeelding 5. Gedrag van de nuldoorgang-triggermethode bij aansturing met 1Hz-PWM (RETE = netspanning).

hebben en wat de werkelijke temperatuur is, kunnen we de de verwarmingselementen overeenkomstig in- of uitschakelen. Om de temperatuur het profiel nauwkeuriger te laten volgen, gebruiken we de PID-regeltechniek. Dit type regeling past een grootheid aan door deze constant te controleren en bepaalde variabelen aan te passen, waarbij wordt geprobeerd om de werkelijke waarde dicht bij de gewenste waarde te houden. Het moge duidelijk zijn dat dit minder triviaal is dan het hier klinkt: er liggen precieze wiskundige formules aan ten grondslag. Gelukkig zijn er speciale bibliotheken voor Arduino die dit veel gemakkelijker maken.

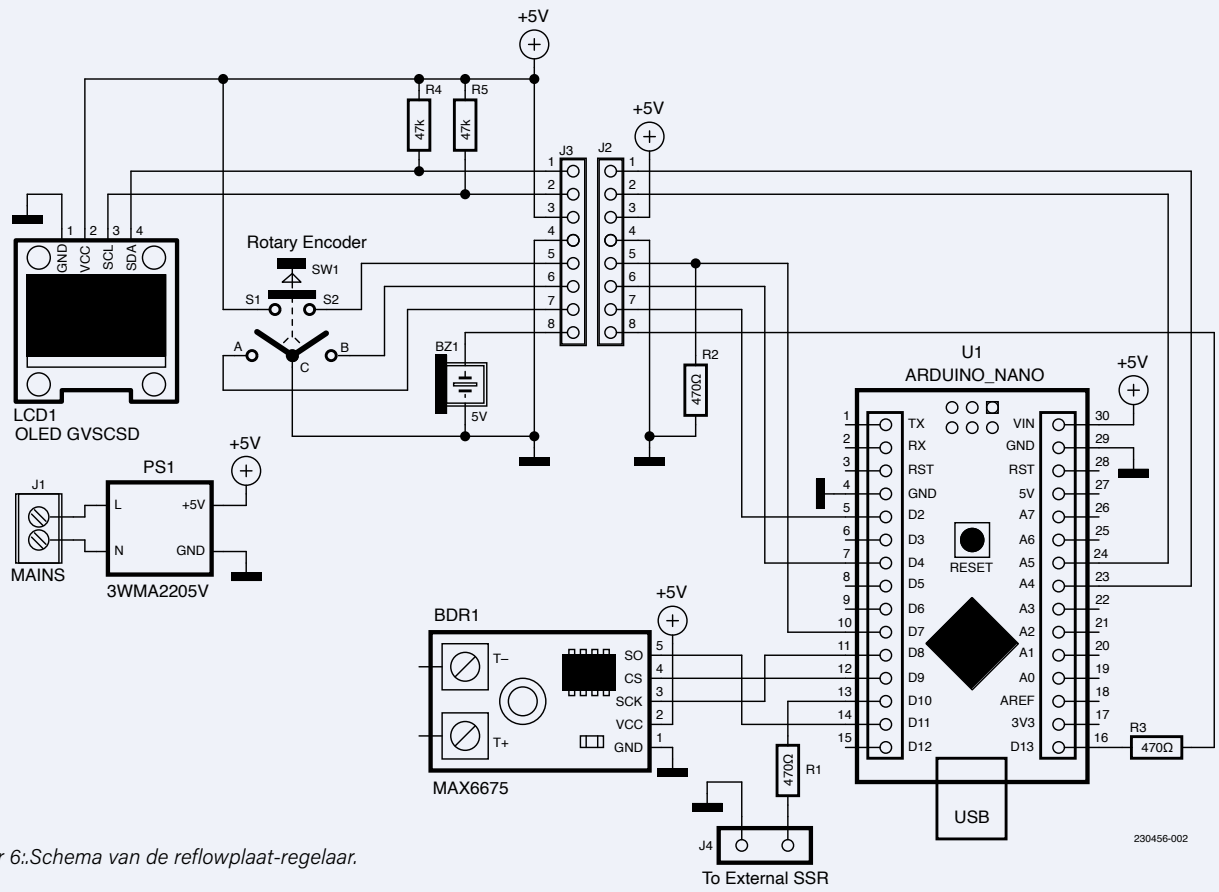
Zoals we al hebben opgemerkt, gebruiken we voor het inschakelen van de plaat een solid-state relais met een 'zero-cross trigger', waardoor de uitgang ervan alleen van toestand verandert – dat wil zeggen van 'aan' naar 'uit' en omgekeerd – wanneer de net-wisselspanning (die zoals we weten een frequentie van 50 Hz heeft) door 0 V gaat. Dit betekent dat er vanaf het moment dat we de ingang van het relais van spanning voorzien of spanningsloos maken tot het moment dat het de belasting in- of uitschakelt, enkele milliseconden kunnen verstrijken.

Het is duidelijk dat deze eigenaardigheid het onmogelijk maakt om de uitgang exact te regelen. In feite zal het aansturen van het relais met een puls die korter duurt dan een halve periode van de netspanning en die we misschien een milliseconde na de nuldoorgang versturen, de belasting niet inschakelen. Als we de puls daarentegen precies op de nuldoorgang sturen, schakelen we de belasting wel in, maar wordt deze pas uitgeschakeld bij de volgende nuldoorgang. Wanneer we **figuur 4** als voorbeeld nemen, hebben we na een pulsreeks die het relais in totaal 23 ms heeft aangestuurd, een uitgang die in totaal 30 ms actief is. Een oplossing zou zijn om een nuldoorgangdetector te gebruiken die, zoals de naam al aangeeft, telkens wanneer de netspanning door de nul gaat een seintje geeft om de PWM-uitgang goed te synchroniseren. In ons geval hebben we, om de schakeling niet ingewikkelder te maken, dit probleem opgelost door een bijzonder lage PWM-frequentie te gebruiken, om precies te zijn 1 Hz. Op deze manier hebben we een totale periode van 1 seconde, of beter 1000 milliseconden, verdeeld in 100 stapjes van elk 10 milliseconden. In de praktijk zullen we voor elke procent verandering van de duty-cycle een verandering in pulslengte hebben van 10 ms, wat precies de duur is van een halve periode van de netwisselspanning. Op deze manier wordt de waarde van de duty cycle die we instellen correct doorgegeven naar de uitgang van het relais, omdat we zeker weten dat dezelfde vertraging die optreedt bij het inschakelen van de belasting ook optreedt bij het uitschakelen ervan, met slechts een mogelijk verschil van 1...9 milliseconden, die de hele periode naar voren verschuift (**figuur 5**). In dit project hebben we slechts één manier om de verwarming te regelen, terwijl de koeling op 'natuurlijke' wijze plaatsvindt door afvoer naar de omgeving. De feitelijke verwarmingscurve zal dus niet gelijk zijn aan de theoretische. Veel hangt af van waar we werken, maar we kunnen je verzekeren dat we na verschillende tests nog nooit problemen hebben gehad om het reflowproces met uitstekende resultaten te voltooien.

Bedradingsschema

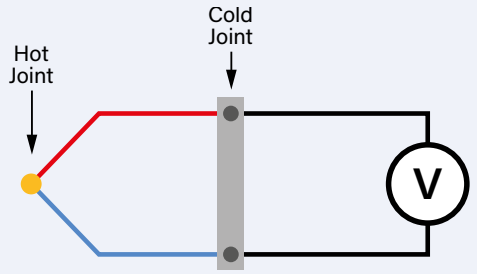
Dankzij het gebruik van Arduino (U1) is het schema (**figuur 6**) eenvoudig; in feite hoeft er alleen een module met een MAX6675 te worden aangesloten. Deze wordt gebruikt om het signaal te versterken dat aanwezig is op de klemmen van het K-type thermokoppel, dat om te zetten van analoog naar digitaal en via de SPI-interface door te geven. In feite zou het uitlezen van dit signaal via de analoge ingangen gecompliceerder zijn, omdat de betreffende spanningen in het microvoltbereik liggen en daarom goed versterkt zouden moeten worden waardoor elektrische ruis de meting zou kunnen beïnvloeden. Om deze reden hebben we besloten om deze chip te gebruiken – om precies te zijn een kant-en-klare module (BRD1) die deze chip bevat, aangezien de MAX6675 alleen in SMD-uitvoering leverbaar is.

De signalen van het thermokoppel worden op de juiste manier omgezet en verzonden via de SCK-, CS- en SO-pinnen die verbonden zijn met de digitale ingangen van U1, die ze verwerkt en op basis daarvan beslist of de temperatuur van de plaat moet worden verhoogd of verlaagd, waarvan het verwarmingselement wordt gevoed door een solid-state relais. In ons geval hebben we een Fotek SSR-25-DA gebruikt – ondergebracht in de reflowplaat en niet zichtbaar in het schema – die belastingen tot 25 A kan schakelen. Het aansturen van dit relais gebeurt via een digitale uitgang via weerstand R1, vergelijkbaar met het schakelen van een LED. In ons geval sturen we een ingebouwde optocoupler aan, die zich in het ingangsgedeelte bevindt.



Figuur 6:.Schema van de reflowplaat-regelaar.

Het thermokoppel



Thermokoppels zijn temperatuurtransducers die in veel sectoren toepassing vinden: industrie, wetenschap, techniek enzovoort. Door hun kleine formaat en snelle respons kunnen ze zelfs in bijzonder kritische omgevingen worden gebruikt, omdat ze over een groot temperatuurbereik nauwkeurige waarden leveren. De grootste voordelen zijn dat ze zeer eenvoudig, duurzaam en goedkoop zijn. Thermokoppels zijn ontworpen voor het meten van hoge temperaturen van voorwerpen, componenten en stoffen.

Elk thermokoppel bestaat uit twee verschillende metalen die verbonden zijn op een punt dat de 'warme las' wordt genoemd. Dit punt wordt in contact gebracht met het voorwerp of de stof waarvan de temperatuur gemeten moet worden. Het andere uiteinde, dat gevormd wordt door de twee vrije draden, wordt de 'koude las' genoemd en als deze wordt aangesloten op een voltmeter, zorgt het temperatuurverschil tussen de twee lassen voor een potentiaalverschil dat evenredig is met de temperatuur (Seebeck-effect). Thermokoppels kunnen er van buiten heel verschillend uitzien, maar in principe werken ze allemaal volgens hetzelfde principe. De koude las ontstaat door het metaal van de thermokoppeldraden en dat van de aansluitdraden. Er zijn verschillende types thermokoppels, maar het type K wordt absoluut het meest gebruikt in de industrie. Dit type bestaat uit een combinatie van draden op nikkelbasis en de meetbereiken lopen van –200 °C tot +1260 °C. Dankzij de corrosie- en oxidatiebestendigheid van nikkel kan dit type in een groot aantal toepassingen worden gebruikt.

De keuze voor een halfgeleiderrelais is ingegeven door het feit dat de aangesloten belasting met PWM wordt aangestuurd, dat wil zeggen door een reeks pulsen die het element meerdere keren per seconde in- en uitschakelen. Een gewoon elektromechanisch relais zou niet alleen niet de vereiste schakelsnelheid hebben, maar ook niet lang meegaan en de contacten zouden onherstelbaar beschadigd raken door vonkoverslag.

Op de SDA- en SCL-pinnen van de Arduino hebben we LCD1 aangesloten, een klein één-inch display gebaseerd op de SSD1306, waarbij we pull-up weerstanden R4 en R5 hebben toegevoegd. Verder hebben we de kwadratuur-draai-encoder SW1 via diens pinnen A en B verbonden met de digitale ingangen van U1. In het schema zie je geen pull-up weerstanden – die hebben we in de microcontroller via software ingeschakeld; pin C is verbonden met GND. De ingebouwde drukknop van de encoder (die wordt bediend door de draaiknop in te drukken) en die de verschillende selecties mogelijk maakt, is aan de ene kant verbonden met V_{CC} en aan de andere kant met pen 10 van U1, samen met pull-down weerstand R2.

Tenslotte is daar nog zoemer BZ1 die via weerstand R3 is verbonden met pen 9 van U1. Het geheel wordt gevoed door de PS1-module, een AC/DC-converter van Hi Link die direct op de print wordt gemonteerd. Deze module heeft een 230V_{AC}-ingang en een 5V-uitgang die

600 mA kan leveren. Deze oplossing bespaart ons het gebruik van een externe voeding: de hele schakeling kan zo in één behuizing worden ondergebracht.

Firmware

De Arduino-sketch, die je kunt downloaden van [1], is behoorlijk omvangrijk; hier bespreken we slechts die delen die relevant zijn voor een goed begrip en waarmee je het project naar wens kunt aanpassen. In de eerste plaats de vier bibliotheken die we gebruiken:

- display (*U8g2* door Oliver)
- MAX6675 (*MAX6675_Thermocouple* door Yurii Salimo)
- PID (*PID* door Brett Beauregard)
- PWM (*https://github.com/maxint-rd/FastPwmPin*)

Vervolgens worden de pinnen gedefinieerd waarop de MAX6675 en de draai-encoder zijn aangesloten, alsmede twee aangepaste grafische symbolen om het thermometer-pictogram op het display weer te geven. Merk op dat in de initiële declaraties het array `profiles` (zoals we al opmerkten) de beide soldeerprofielen definieert:

```
int profiles [2][6][2] = {
{, , , ,
    , }, // Lead profile
{, , , ,
    , } // Lead-free profile
};
```

Hier kun je desgewenst een profiel wijzigen of toevoegen door de arraywaarden op de juiste manier aan te passen; daarbij verwijst de eerste waarde van elk paar naar de tijd in milliseconden en de tweede naar graden celsius; de tabellen in figuur 3 maken dit duidelijk. Na deze matrix komt nog een groep variabelen waar je wellicht iets wilt wijzigen:

```
int tempMinPreheater = 60;
    //set the minimum temperature that
    // can be set as a preheater
int tempMaxPreheater = 250;
    //set the maximum temperature
    // that can be set as the preheater
int tempStepPreheater = 5;
    // set the value of the setting
    // steps for the preheater
int tempAmbient = 50;
    //set the maximum ambient temperature,
    // if the plate is warmer, the
    // remelting process cannot be started
int tempAdjust = 0;
    //correction of the
    // temperature read by the probe
```

Deze code is ruimschoots voorzien van commentaar, zodat je gemakkelijk ziet dat de eerste twee regels de minimum- en maximumwaarden aangeven die kunnen worden ingesteld; de derde geeft de waarde aan die wordt opgeteld bij of afgetrokken van de ingestelde temperatuur voor elke verdraaiing van de encoder; deze waarden hebben alleen betrekking op de voorverwarmer-functionaliteit. De variabele `tempAmbiente` geeft de maximale temperatuur aan die de plaat kan hebben voordat het omsmelten begint en wordt kamertemperatuur genoemd, omdat de plaat natuurlijk de temperatuur aanneemt van de omgeving waarin hij zich bevindt. Dit voorkomt dat het ene soldeerproces meteen na het andere begint. In dat geval zou het namelijk de reflow-curve vervormen met het risico dat de hele procedure verkeerd verloopt. De variabele `tempAdjust` wordt gebruikt om de temperatuurmeting van de plaat te corrigeren.
De rest van de sketch behoeft weinig commentaar. Het uitlezen van de knoppen en de encoder en het periodiek bijwerken van het display gebeurt zonder gebruik te maken van interrupts; om het lang indrukken van SW1 te detecteren en het display periodiek te actualiseren worden enkele timers gebruikt. In de code die de reflow-functionaliteit afhandelt, kunnen we zien hoe we de formule voor lineaire interpolatie gebruiken om te berekenen wat de temperatuur van de plaat op elk moment moet zijn:

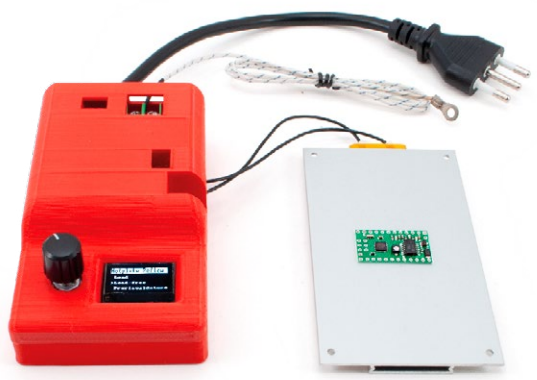
```
reflowNowTime = (unsigned long)(millis() - reflowStartTime);
    // Calculates how many milliseconds
    // the reflow cycle started;
for (int i = 0; i < 6; i++) {
  if ((reflowNowTime >=
        (profiles[profile][i][0] * second)) &&
        ( reflowNowTime <
              (profiles[profile][i + 1][0] * second)) {
    xa = profiles[profile][i][0] * second;
    xb = profiles[profile][i + 1][0] * second;
    ya = profiles[profile][i][1];
    yb = profiles[profile][i + 1][1];
    tempTarget = ((((reflowNowTime - xa) *
                    (yb - ya)) / (xb - xa)) + ya;
    // y0=( ( (x0-xa)*(yb-ya) ) / (xb-xa) ) + ya
    // Linear interpolation formula

    phaseActual = i;
    ruleHeater();
  }
}
```

In de `for`-lus scrollen we door het array van profielen om de bekende waarden te krijgen (op de x-as zijn dat milliseconden en op de y-as graden celsius). Zo krijgen we de waarden `xa`, `ya`, `xb`, `yb`, terwijl `x0` gelijk is aan de milliseconden die zijn verstreken sinds het begin van de reflow-fase. Hiermee kunnen we `y0` berekenen, wat de temperatuur is die moet worden ingesteld voor onze reflowplaat.

Praktische uitvoering

Voor de controller is een overzichtelijke print ontworpen die een compacte en eenvoudige montage mogelijk maakt. We kunnen het encoder- en displaygedeelte van elkaar scheiden, zodat het geheel in talloze verschillende behuizingen kan worden ondergebracht. Als je besluit om de print te splitsen, moet je de twee delen uiteraard met elkaar verbinden via connectoren J2 en J3. Optimaal is inbouw



Figuur 7. Het volledige systeem, inclusief het thermokoppel dat met een schroefoog wordt bevestigd.

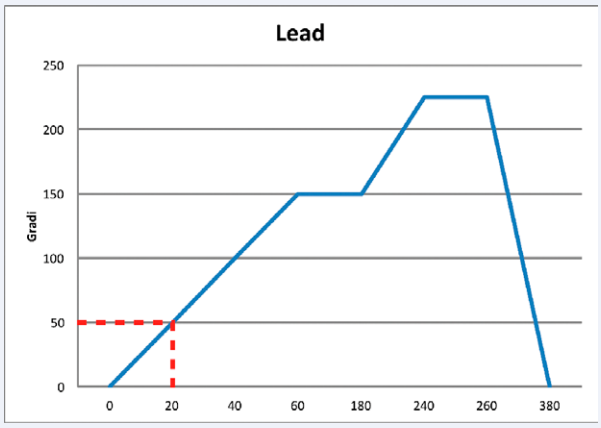
in een kunststof behuizing die volledige isolatie mogelijk maakt. Een oplossing zou kunnen zijn om een aftakdoos voor elektrische installaties te gebruiken, met in het deksel openingen voor het display en de draai-encoder.
Omdat met de netspanning wordt gewerkt, is het wellicht een goed idee om het solid-state relais en de 230V-uitgang voor de reflowplaat en de connector voor de K-type thermokoppel samen met de schakeling geïsoleerd in te bouwen. Om een nauwkeurige temperatuurmeting mogelijk te maken, is het belangrijk om de sensot op de juiste manier te positioneren, bijvoorbeeld door hem stevig op de reflowplaat te bevestigen met een metalen beugel. Je kunt de sensor bijvoorbeeld in een aluminium schroefoog steken, met een tang fixeren (zonder de sensor te beschadigen). Dan kan de sonde gewoon op de plaat worden vastgeschroefd (**figuur 7**), misschien met een dot warmtegeleidende pasta om de thermische geleiding en dus de afleesnauwkeurigheid te verbeteren.
Een andere oplossing is om de sensopr 'los' te gebruiken en hem telkens met een stukje hittebestedige tape vast te plakken op de print die je wilt solderen.

Waarschuwing: wees uiterst voorzichtig bij de bouw en bedrading, gezien de aanwezigheid van levensgevaarlijke netspanning. Vergeet niet de aarde met de randaarde van de stekker en alle metalen delen van het apparaat, inclusief de reflowplaat zelf, te verbinden.

Kalibratie en gebruik

Zodra de Arduino is geprogrammeerd en alles is opgebouwd, kunnen we na zorgvuldige controle van de bedrading (vooral de netspanning voerende delen) de reflowplaat inschakelen en de goede werking ervan controleren. Voor gebruik is het echter handig om een eenvoudige, maar nuttige kalibratie uit te voeren. In de praktijk kunnen, afhankelijk van waar we sensor monteren, de gemeten temperaturen geringe afwijkingen vertonen; dit komt door de plaatsing van de verwarmingsweerstanden, die meestal in het midden zitten, en precies daar krijgen we een nauwkeurigere aflezing. Als we de sensor op een andere plek monteren, zullen de aflezingen kleine verschillen vertonen die toenemen naarmate de afstand tussen sensor en warmtebron groter wordt.

Lineaire interpolatie



In de wiskunde is interpolatie een methode om nieuwe punten in een rechthoekig coördinatenstelsel af te leiden uit een eindige verzameling bekende punten. Interpolatie maakt het dus mogelijk om bij benadering de trend van een kromme af te leiden wanneer slechts een paar punten ervan bekend zijn. Bij lineaire interpolatie, de eenvoudigste interpolatiemethode, heeft men slechts twee opeenvolgende punten nodig, geïdentificeerd door (xa, ya) en (xb, yb), die via een rechte lijn met elkaar verbonden zijn.
We kunnen met de onderstaande formule een punt (x0, y0) berekenen dat tussen de bekende punten ligt:

$$y0=\frac{(x0-xa)(yb-ya)}{xb-xa}+ya$$

Als voorbeeld nemen we bovenstaande grafiek; de eindpunten van het eerste lijnsegment zijn bekend: (0,0) en (60,150). We willen weten wat de waarde van y0 is voor het punt x0 = 20.

$$y0=\frac{(20-0)(150-0)}{60-0}+0$$

$$y0=\frac{20*150}{60}$$

$$y0=\frac{3000}{60}$$

$$y0=50$$

Om de meting te corrigeren, hebben we voorzien in de variabele tempAdjust, die standaard op nul staat. Als je een manier hebt om de exacte temperatuur van de plaat te meten met een infrarood- of andere thermometer, kun je de temperatuur die door onze schakeling wordt gemeten vergelijken met die van de thermometer. Het verschil tussen die twee moet dan worden toegewezen aan de genoemde variabele. Zo kun je de meting corrigeren tot een waarde die dichter bij de werkelijke waarde ligt. Daarna ben je klaar om je schakelingen te gaan solderen. We raden je aan om te beginnen met kleine printjes, bijvoorbeeld kleine SOIC/DIL-adapters – je moet je eerst vertrouwd maken met de hoeveelheid soldeerpasta die je op de soldeereilandjes moet aanbrengen, en met de juiste positionering van de componenten.

Praktisch gebruik

Naast het gebruik voor reflowsolderen kan dit project ook worden gebruikt om printen voor te verwarmen als je met een heteluchtstation aan de slag wilt. In dat geval moet de print op ongeveer 150 °C worden gebracht, waarna de te solderen onderdelen worden verwarmd met het heteluchtstation zodat vloeimiddel en soldeer smelten.

230456-03

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.

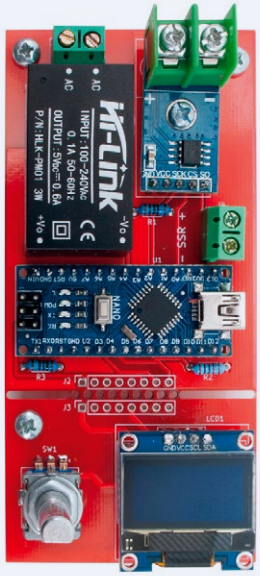
Gerelateerde producten

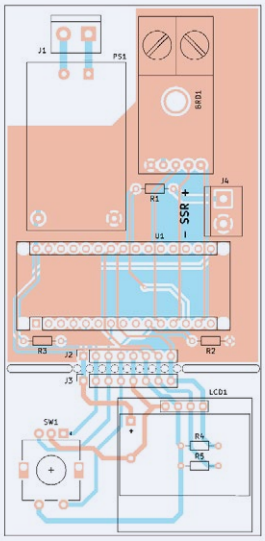
- **Upgraded T-962 Infrared Reflow Oven (Elektor Version) (SKU 20346)**
  www.elektor.nl/20346
- **2-in-1 SMD Hot Air Rework Station ZD-8922 (SKU 20141)**
  www.elektor.nl/20141

WEBLINK

[1] Projectpagina bij dit artikel:
http://www.elektormagazine.nl/230456-03

Onderdelenlijst





Weerstanden:
R1...R3 = 470 Ω
R2 = 10 k
R4...R5 = 47 k

Modules:
U1 = Arduino Nano
PS1 = 3WMA2205V (PSU-module)
BRD1 = MODMAX6675 (voor thermokoppels van het K-type)
LCD1 = OLEDGVSCSD (0,96″ OLED)

Diversen:
BZ1 = 5V-zoemer (zonder oscillator)
4-polige busstrip
15-polige busstrip
5-polige busstrip
2-polige printkroonsteen
draai-encoder met drukknop

Q&A met Alberto Savoia

oprichter & innovatie-activist, Pretotype Labs LLC

Begin niet met een prototype – **begin met een pretotype!**

kijk of er wel een markt is voor je product voordat je de soldeerbout warmstookt

Stuart Cording (Elektor)

Wij techneuten hebben bijzondere gaven. Dankzij ons begrip van elektronica en software is het niet moeilijk voor ons om een hightech oplossing te bedenken voor de problemen om ons heen. En van daaruit is het slechts een kleine stap naar het oprichten van een bedrijf en naar 'wereldheerschappij'. Wat kan er misgaan? Nou ja, eigenlijk best veel.

Uit diverse bronnen blijkt dat 20% van de nieuwe bedrijven aan het einde van hun eerste jaar moet stoppen, en dat zo'n 50% het vijfde jaar niet haalt [1]. De redenen hiervoor variëren van juridische problemen via burn-out tot een slecht product en het verliezen van de focus. Maar geen van deze redenen haalt de top vijf. Het is ongelooflijk maar waar: na al het werk en uitgegeven geld geeft 42% van de startup-lijkschouwing aan dat er domweg geen markt voor het product was [2].
Waarom zaten deze startups bij zo'n fundamenteel punt van hun bedrijfsplan zo fout? Iemand die veel tijd aan deze vraag heeft besteed is Alberto Savoia. Als voormalig werknemer van zowel Sun Microsystems als Google heeft hij ervaren hoe succesvol startups kunnen zijn, door zelf een bedrijf van $ 100 miljoen op te bouwen met $ 3 miljoen aan financiering. Maar hij verloor ook een startup die $ 25 miljoen aan durfkapitaal had verzameld. Alberto sprak met Elektor over succes en mislukken van producten, zijn passie voor solderen, en waarom iedereen aan pretotyping zou moeten doen.

Stuart Cording: Als we naar uw curriculum kijken, dan zou je zeggen dat u bij uitstek gekwalificeerd bent om een succesvolle startup te beginnen. Uw derde startup mislukte echter – waarom?
Alberto Savoia: Tja, ik voelde me verschrikkelijk. Gedurende een periode van vijf jaar hadden we bijna 100 mensen aangenomen die zich voor ons hadden ingezet en die aandelenopties hadden. En toen het niet lukte, voelde ik me dus wat hen betrof erg slecht. En dat is wat mij motiveerde om deze vraag eens te onderzoeken en proberen te beantwoorden. Want we hadden toch echt de beste mensen aangenomen. En we hadden toch ook de beste investeerders (venture capitalists, VC) in Silicon Valley, die $ 25 miljoen inbrachten, dus we hadden genoeg geld. Ook vertelde men ons dat het product goed zou werken. En toen we het gewoon gebouwd. En toch ging het de mist in. Wat hadden we verkeerd gedaan? Het bleek dat we iets bouwden wat ik 'het verkeerde ding' ('the wrong it') noem. Het maakte niet uit hoe goed het gebouwd was of op de markt gebracht: er zou nooit een markt voor zijn. Dat zette mij aan het denken: hoe kan ik er voortaan achter komen of een product 'het goede ding' ('the right it') zal zijn?

Over Alberto Savoia

Als eerste *Director of Engineering* bij Google leidde Alberto Savoia het team dat *Google AdWords* lanceerde. Later, in zijn rol als *Innovation Agitator* bij Google, ontwikkelde hij pretotyping – een op gedegen data gebaseerd systeem voor het valideren van nieuwe product-ideeën. Voordat hij bij bij Google kwam, was Alberto een aantal keren succesvol ondernemer en de eerste *Director of Software Technology Research* bij Sun Microsystems Laboratories, waar hij een sleutelrol speelde in de ontwikkeling van Java-technologie en -tools.
Alberto's werk op het gebied van innovatie heeft aanzienlijke erkenning en prijzen van de industrie opgeleverd, waaronder *The Wall Street Journal Technical Innovation Award*, *InfoWorld's Top 25 CTOs Award* en *InfoWorld's Technology of the Year Award*. Tegenwoordig is hij zeer gewild als spreker, docent en coach, befaamd vanwege zijn vermogen om organisaties te helpen hun volledige potentieel voor innovatie en groei te benutten. Vanaf zijn inaugurele *Entrepreneurial Innovation* workshop aan Stanford in 2011 tot aan zijn huidige coaching van Fortune 500-bedrijven heeft Alberto een stevige en blijvende invloed gehad op productmanagement en innovatie bij veel toonaangevende bedrijven over de hele wereld. Zijn nieuwste boek, *The Right It – Why So Many Ideas Fail and How to Make Sure Yours Succeed*, werd in 2019 gepubliceerd door HarperCollins.

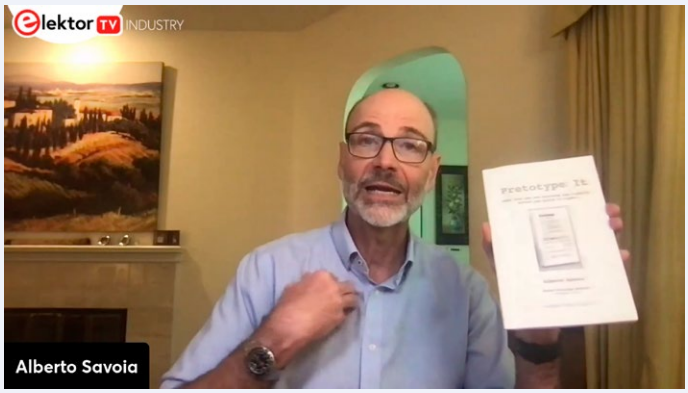
Stuart Cording: Om een succesvolle startup te creëren bevelen de meeste boeken twee dingen aan – een solide bedrijfsplan en een geweldig team. Waarom is dat niet genoeg?
Alberto Savoia: Ik heb ongeveer een dozijn bedrijfsplannen geschreven, en er een paar honderd gelezen toen ik VC's hielp de informatie te controleren. En ik kan u vertellen dat de meeste bedrijfsplannen fictie zijn. Ik leer mensen nu om hun bedrijfsplan te redigeren. Neem markers in drie of vier verschillende kleuren. Alles wat een aanname is markeer je rood. Alles wat je gelooft of hoopt maak je geel, enzovoort.
Als je dan alles elimineert wat irrelevant is, zoals hoe en waarom een ander bedrijf is geslaagd, dan houd je hooguit een halve pagina aan materiaal over. De rest is fictie – vooral de vijfjarige financiële vooruitblik!

Stuart Cording: Hoe kun je dus zien of je product zal slagen?
Alberto Savoia: Ik heb daarom de definitie 'het goede ding' bedacht, en dat is een product dat zal slagen indien het vakkundig wordt gelanceerd. Dat betekent dat 'het verkeerde ding', hoe goed het ook is, door de mand zal vallen. Dat is dus punt één.
De volgende vraag is dan: is mijn product 'het goede ding'? Het eerste wat ik doe is het in heel nauwkeurige taal beschrijven. De lezers van Elektor zijn waarschijnlijk allemaal technici, dus ze zullen niet zeggen: "Ik zal een grote weerstand gebruiken." Dat is namelijk niet genoeg. Hoeveel ohm moet hij zijn? Hoeveel watt moet hij aankunnen?
Dus ik begin met een aanname, een duidelijke hypothese, en test die hypothese dan. We hebben te maken met mensen en markten, dus er is geen 0% of 100% zekerheid. In plaats daarvan werk ik in termen van kans op succes, waarbij we de kansen inschatten in vijf gradaties – 10%, 30%, 50%, 70% en 90%. Daarna voer ik experimenten uit, kijk of de hypothese wordt bevestigd, en breng vervolgens wijzigingen aan om te zien of we de kans op succes kunnen verbeteren.

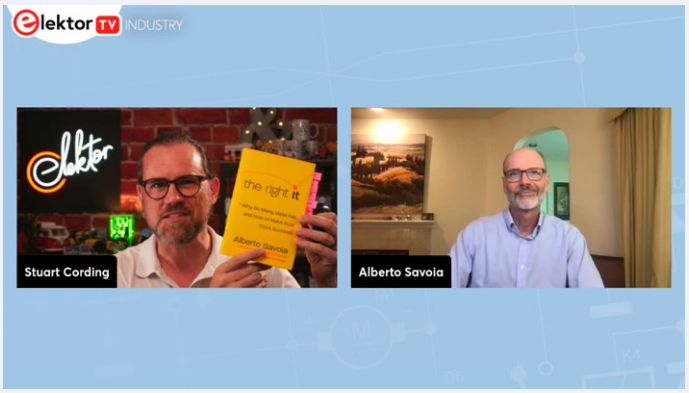
Stuart Cording: We hebben het dus over het bouwen van een eerste prototype, ook wel een minimum viable product (MVP) genoemd, dat per definitie tijd en (veel) geld kost? Of is er een betere manier?
Alberto Savoia: Begrijp me niet verkeerd, ik ben zielsgelukkig met een soldeerbout in mijn hand, of zittend voor een compiler. Ik vind het leuk om dingen te bouwen. Wat ik niet leuk vind is dingen te bouwen die mislukken, terwijl ik dingen had kunnen bouwen die slagen.
Om dit op te lossen heb ik een nieuwe term bedacht: 'pretotyping' (van pretend prototyping), dus het bouwen van een soort namaak-protytype. Ik had bijvoorbeeld een idee voor een toonregeling voor audiofielen ('The Delicious One'), omdat er een trend is om 'pure' versterkers te maken die het ingangssignaal niet veranderen. Uiteindelijk heb ik deze toonregeling gebouwd, maar het duurde maanden om hem helemaal goed te krijgen. Dus, om er zeker van te zijn dat dit het goede ding was voordat ik ermee verder ging, heb ik eerst een pretotype gemaakt.
Ik wist hoe hij eruit moest gaan zien, en dus maakte ik een grote zwarte kast met ingangen, uitgangen en een mooie knop. Er zat niets in, maar ik gebruikte hem als fotomodel en bouwde een website die je nog steeds kunt bezoeken (*deliciousdecibels.com*). Ik maakte er reclame voor op websites voor audiofielen in de VS. En als iemand me een mail stuurde, vertelde ik hem dat het apparaat nog in ontwikkeling was en $ 300 zou gaan kosten. Dat bood al een zekere indruk van het apparaat. Later deelde ik de toonregelkarakteristieken met hen, maakte een video en stuurde een mail waarin ik zei dat voor $ 50 konden voorbestellen als ze dat wilden. Het spel werd een stuk spannender toen mensen daadwerkelijk voorbestellingen wilden plaatsen.
Zo verzamelde ik mijn eigen gegevens over de mogelijke markt voor mijn toonregeling. Dus geen informatie over eerdere sucessen van andere apparaten, bekend als 'wat anderen hebben gedaan' (other people's data, OPD). Je moet in die pretotyping-fase je eigen gegevens verzamelen (your own data', YODA).

Figuur 1. Pretotype van 'The Delicious One', gebruikt bij de fake door-methode.

Figuur 2. Prototype van de toonregeling, ontwikkeld nadat voldoende 'eigen data' over de levensvatbaarheid ervan waren verzameld.



Figuur 3. Voordat Alberto begon met het schrijven van een boek over pretotyping-technieken, maakte hij een pretotype van het boek. Uit de interesse van collega's bleek dat er een markt voor was.



Figuur 4. Op basis van het succes van zijn pretotype ontving Alberto een voorschot om 'The Right It' te schrijven, wat negen maanden in beslag nam.

Stuart Cording: In uw boek The Right It worden enkele slimme pretotyping-methodes beschreven. Maar sommige suggesties, zoals het faken van 'The Delicious One', overschrijden voor sommigen misschien ethische grenzen. Hoe zijn mensen die uw methode beoefenen, hiermee omgegaan?
Alberto Savoia: De aanpak met de toonregeling staat bekend as 'fake door' (zo'n toneeldeur die nergens naar leidt). Je hebt het product dus niet, maar je doet gewoon alsof je het wel hebt. Dat is niet onethisch, tenzij je geld lospeutert van investeerders, of mensen het kopen en je het product dan niet levert. Ik zou ook nooit deze methodes aan de Universiteit van Stanford kunnen doceren als ze niet eerst een ethische toetsing doorliepen.
Ondernemers en vernieuwers vervullen een waardevolle rol, zo niet de meest waardevolle. Dus naar mijn mening is het grootste ethische probleem dat men ondernemers niet leert om hun middelen te gebruiken om producten te bouwen die de wereld echt nodig heeft. Wanneer je aan pretotyping doet, dan voer je kleine tests uit bij een kleine groep van mensen. Met de fake door is het ergste wat er kan gebeuren dat je moet zeggen: "Het spijt me, het product is niet beschikbaar, maar bedankt dat u belangstelling hebt getoond." Doordat ze op een knop op je website hebben geklikt, heb je wel een indicatie dat ze het product willen.

Stuart Cording: Maar zeg eens eerlijk Alberto – heb je ooit iemand dat goede ding zien vinden en toch, ondanks financiering en een competent team, hun startup zien mislukken?
Alberto Savoia: Oh ja, natuurlijk. Het idee kan het juiste zijn. Maar, zoals ik in het boek schrijf, is het geen garantie dat jij dan degene bent die ermee gaat slagen. Wat er bijvoorbeeld zou kunnen gebeuren is dat je ontdekt dat er vraag is naar je hardware. Dus je bouwt je apparaat en doet verder alles goed. En dan blijken anderen een software-app te ontwikkelen die hetzelfde doet op een smartphone voor een fractie van de prijs. Veel oudere apps faalden omdat Apple en Android de functionaliteit ervan rechtstreeks in hun besturingssysteem integreerden. Dus ja, het kan misgaan, zelfs als je 'het goede ding' hebt. Maar dat betreft dan de juiste verwezenlijking, en dat is niet mijn vakgebied.
Dus nogmaals, met jouw eigen data die jouw hypothese onderschrijft ben je vrijwel zeker dat je product zal slagen indien het levensvatbaar is. Ik hou van alles wat met elektronica te maken heeft en ik vind Elektor een geweldig tijdschrift. Dus ik zou uw lezers willen adviseren om dezelfde zelfkritische en experimentele houding te hanteren bij het testen van de markt als bij het testen en ontwerpen van het product.
Helaas zijn er geen garanties in het leven, maar er zijn wel mislukkingen die vermeden kunnen worden. Wat echt pijn doet is $ 5 miljoen uitgeven aan het bouwen van een product, het vervolgens lanceren, en het dan zien mislukken. Ik krijg elke week wel e-mails in de trant van "Had ik je boek maar eerder gelezen." Want die vijf jaar durende mislukking had in vijf dagen voorkomen kunnen worden als je eerder had onderkend dat niemand je product wil kopen.

Het volledige interview met Alberto is te zien op het *Elektor TV – Industry* YouTube-kanaal, in aflevering 27 van Elektor Engineering Insights (*https://youtu.be/-wTUKiTfF5s*). En als u meer wilt weten over YODA, het testen van uw markthypothese en pretotyping-technieken, lees dan *"The Right It – Why So Many Ideas Fail and How to Make Sure Yours Succeed"* van Alberto Savoia, gepubliceerd door Harper One (ISBN 978-0-06-288465-7) [3].

230484-03 (vertaling: Marc Gauw)

Over Stuart Cording

Stuart Cording is technicus en journalist met meer dan 25 jaar ervaring in de elektronica-industrie. U kunt veel van zijn recente Elektor-artikelen vinden op *www.elektormagazine.com/cording*. Naast het schrijven voor Elektor presenteert hij een regelmatig livestream-interviews: *Elektor Engineering Insights* (*www.elektormagazine.com/eei*).

WEBLINKS

[1] Percentage mislukkingen van startups: https://failory.com/blog/startup-failure-rate
[2] No Market Need — Final Evaluation Report [PDF]: https://tinyurl.com/nomarketneed
[3] "The Right It" door Alberto Savoia: https://albertosavoia.com/therightit.html

elektor TV
Watch this on Elektor TV - Industry

2023: een AI-odyssee

hulp bij het ontwerp van een tastbaar project

Brian Tristam Williams (Elektor)

Na mijn eerdere verkenning van de mogelijkheden van ChatGPT, en dan vooral de chat over discrete wiskunde, moest ik meer en meer denken over het probleem van de 'torens van Hanoi'. Het werd een echte obsessie. Daarom besloot in om er een ambitieus fysiek project van te maken, met hulp van onze AI-vriend!

Figuur 1. De uitgangspositie van de 'Torens van Hanoi' (foto: Adobe Stock/Francesco Milanese).

De torens van Hanoi

Nog even de regels van de 'torens van Hanoi'. Het gaat om een klassieke wiskundige puzzel over drie pennen (zuilen of torens) en een aantal schijven met een gat erin die op de pennen kunnen worden gestapeld (**figuur 1**). De schijven hebben verschillende diameters, en de uitgangstoestand is dat alle schijven op één van de pennen op elkaar zijn gestapeld, en wel zo dat de grootste onderaan en de kleinste bovenaan ligt. Het is nu de bedoeling om de hele stapel te verplaatsen naar een andere pen, waarbij je maar één schijf tegelijk mag verplaatsen. Het aantal zetten is onbeperkt, maar bij elke zet mag een schijf nooit op een kleinere schijf liggen. Je kunt er meer over lezen op Wikipedia [1] of het zelf online uitproberen op [2].

Dit probleem wordt vaak gebruikt om in het computeronderwijs recursieve algoritmen te verduidelijken: het minimum aantal zetten dat nodig is om een stapel van n schijven te verplaatsen, is altijd gelijk aan een macht van twee min één. Het kleinste voorbeeld is het verplaatsen van één schijf. Hoeveel zetten kost dat? Met $n = 1$ is het minimum aantal zetten $2^n - 1$, is 1. Eén zet dus. Dat ligt voor de hand. Met twee schijven hebben we $2^2 - 1$ oftewel drie zetten nodig. Voor drie schijven wordt dat zeven zetten, voor vier schijven 15 enzovoort.

De handen uit de mouwen

Na een slapeloze nacht was idee tot wasdom gekomen: ik wilde een 'Torens-van-Hanoi '-eierwekker bouwen. De puzzel zou automatisch moeten worden opgelost met één zet per seconde. Als de puzzel is opgelost, zijn de eieren gekookt. Natuurlijk wil niet iedereen zijn eieren even hard of zacht, maar over het algemeen wordt aanbevolen om eieren drie tot negen minuten te koken. Acht schijven leek me ideaal. Dan zijn er $2^8 - 1$, dus 255 zetten nodig om de puzzel op te lossen. Met één zet per seconde kost dat vier minuten en vijftien seconden. Voor mij is dat goed genoeg. (Natuurlijk moet de tijd instelbaar zijn voor andere eiliefhebbers, maar dat komt later.)

Het programmeren van een microcontroller in assembler, C of Arduino, is voor mij geen probleem. En ik kan goed overweg met een soldeerbout. Dus programmeren, printlayout en bouw van de schakeling kan ik wel aan. Toch is dit voor mij een ambitieus project, want van mechanisch ontwerp heb ik geen kaas gegeten, hoewel computerbesturing me fascineert sinds ik de eerste primitieve tafel-robotam in actie zag.

Ik zou dus iets moeten bouwen dat een schijf van een pen tilt, hem verplaatst en netjes op een andere pen deponeert. Dat 'één keer per seconde' kan nog een hele uitdaging worden, maar dat is het doel waarnaar ik streef.

Een vraag voor ChatGPT

Dus met dit idee in mijn hoofd ging ik op weg naar de residentie van de Tovenaar van Chat. We hadden een zeer lange discussie, die pas stopte toen mijn GPT-4 -tegoed op was en ik voorlopig niet verder kon. Misschien maar goed ook, want dit artikel moet ook weer niet te lang worden. Ik ga hier niet de hele chat van 9784 woorden herhalen, maar die is te vinden op [3].

Ik begon met uit te leggen dat ik hulp nodig had bij het mechanische ontwerp van mijn project. ChatGPT wilde me maar al te graag helpen. Hij kwam met enkele goede conceptuele ideeën, zoals een draaiende basis om de torens/pennen te bewegen in plaats van een arm van de ene pen naar de andere te moeten verplaatsen. Maar ook het optillen zou op verschillende manieren kunnen. Gebruiken we een grijper, een elektromagneet, een zuignap of iets anders? En hoe moet de arm omhoog en omlaag bewegen? Een lineaire actuator klinkt goed, maar die zijn in het algemeen behoorlijk duur, dus misschien overdreven voor dit project. Natuurlijk wees de bot erop dat we sensoren nodig zouden hebben om dingen te detecteren, zoals wanneer een schijf stevig vastgepakt is, en misschien ook die al hoog genoeg is opgetild (als de software dat niet kan bijhouden). Ook wilde hij helpen om de grootte van elke schijf te detecteren, maar dat vond ik niet nodig omdat de momentele toestand van het spel toch al in het geheugen staat.

Ik vroeg hem om de bouw in grote lijnen te beschrijven. Ik was onder de indruk van waar hij allemaal rekening mee hield (**figuur 2**). Hij wilde ook helpen met de software, maar ik herhaalde dat ik dat zelf wel kon, ik wilde alleen maar een mechanisch ontwerp dat de keuken niet verwoest met vliegende schijven.

Absolutely, Brian. Designing a motorized arm from scratch can indeed be a bit daunting. Here's a basic outline of a motorized arm concept that might work for your project:

Motorized Arm Structure:

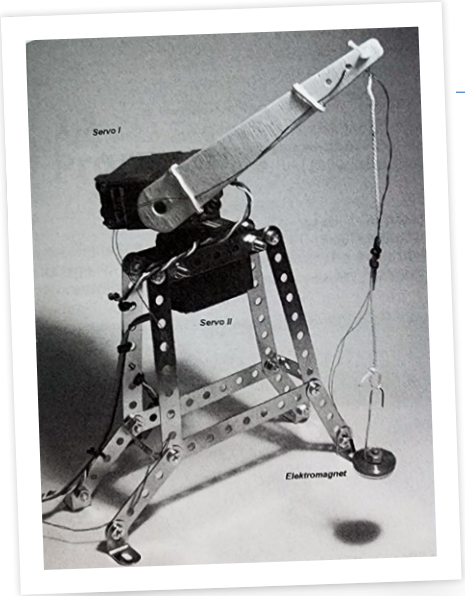
1. **Base Structure**:
   - **Material**: Start with a sturdy material like aluminum or steel for the base to hold the motors and arms.
   - **Design**: A circular or hexagonal base that allows for the placement of three spikes equidistant from each other.
2. **Arm Mechanism**:
   - **Servo Motors**: Utilize servo motors at the base for the rotation of the arm around the central axis.
   - **Linear Actuator**: Implement a linear actuator for vertical movements, allowing the arm to lift and lower the discs.
3. **End Effector**:
   - **Design**: A simple clamp or fork design could work to pick up and hold the disks securely.
   - **Material**: Consider lightweight materials like plastic or aluminum to reduce the load on the motors.
4. **Control System**:
   - **Microcontroller**: Use a microcontroller (like Arduino or Raspberry Pi) to control the motors and actuators, following the Towers of Hanoi algorithm to move the disks accurately.
   - **Power Supply**: Ensure a reliable power supply to the motors and controller.
5. **Software**:
   - **Programming**: You'll program the microcontroller with the sequence of moves based on the Towers of Hanoi solution algorithm.
   - **Manual Override**: Implement a manual override system to stop or reset the operation if needed.

Figuur 2. ChatGPT kwam meteen met enkele goede ideeën.

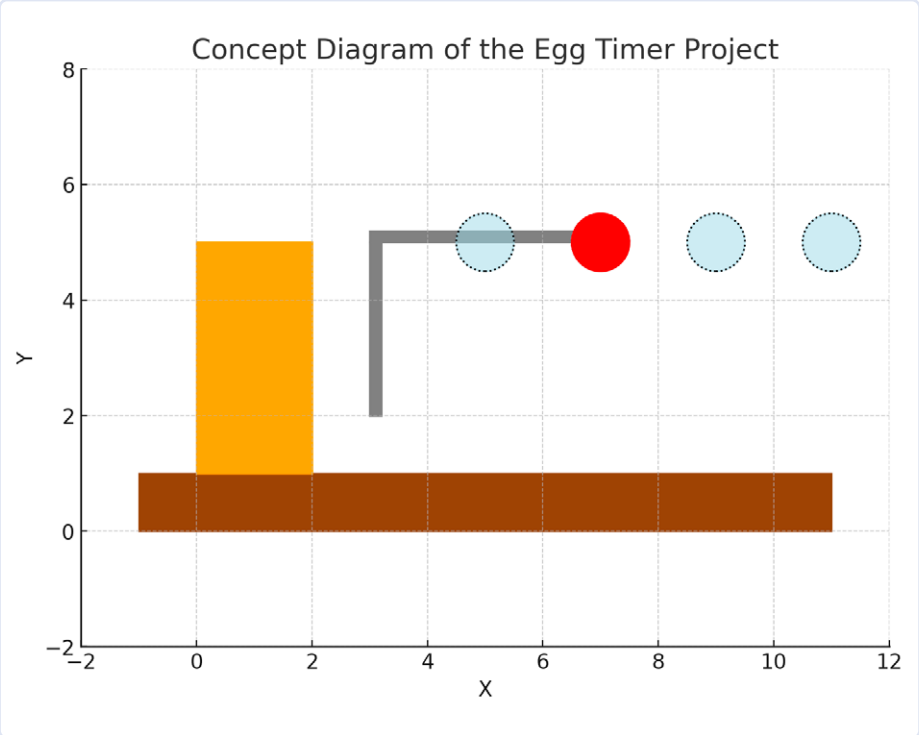
AI op de cover

Nu we het toch hebben over kunstmatige intelligentie die ons helpt onze creatieve dromen te realiseren, zoals het ontwerpen een elektronisch product, het schrijven van code voor ons nieuwste spel, of, letterlijk, kunst te produceren, is het de moeite waard erop te wijzen dat we dit jaar al twee opmerkelijke covers hebben gemaakt met behulp van generatieve AI-afbeeldingen. Deze verfrissende terugkeer naar de tijd dat onze voorpagina's handgemaakte kunstwerkjes waren, is voor een robot alleen ondoenlijk, en daarom moest onze uiterst getalenteerde Art Director Harmen Heida de prompts verfijnen en het eindresultaat zorgvuldig bijwerken met zijn vertrouwde digitale grafische tools.

Ik ben zelf geen kunstenaar en daarom ben ik altijd een beetje jaloers op de creativiteit van het maken van een pakkende cover, om nog maar te zwijgen van het fraaie tijdschrift dat je nu in handen hebt. Midjourney [4] kan weliswaar helpen om te zien wat we ons vroeger alleen konden verbeelden, maar er zijn nog veel andere, meer technische, visioenen die we kunnen realiseren met AI.



Figuur 3. Zo bouwt Dr. Spanner een prototype. Bron: Arduino: Circuits and Projects Guide (Elektor, 2013).



Figuur 4. Deze conceptschets was niet erg bemoedigend.

De keuze van de onderdelen

Toen we het over het draaien van het mechanisme hadden om van de ene pen naar de andere te gaan, kwamen we voor de keuze tussen een servo (mijn eerste idee) en een stappenmotor te staan. Toen ik vroeg wat het beste zou zijn, gaf hij een uitgebreide uitleg over de voor- en nadelen van beide oplossingen. Op basis van het antwoord (zie [3]) bleef ik toch de voorkeur geven aan een servo om rond de Y-as te draaien.

En hoe realiseren we de verticale beweging langs de Y-as? Een lineaire actuator, of misschien een goedkope motor met een draadstang? Er zijn vast nog betere manieren, en misschien hebbe onze lezers of mijn briljante Elektor-collega's een idee, maar ik wilde het juist zelf oplossen met de hulp van ChatGPT (en een hoop gegoogel voor de geschikte onderdelen).

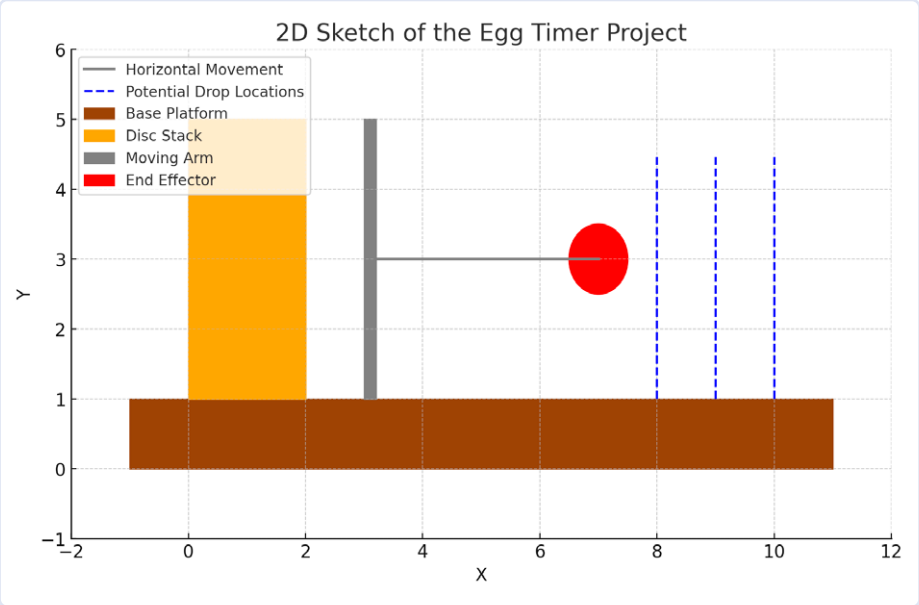
Na de discussie over de verticale beweging kwamen we bij het punt dat de timer pas gestart mag worden als het water kookt. Dat kost wel even tijd. Wat moet ik doen, ik kan toch moeilijk gaan staan kijken tot het kookt? Het zou veel mooier zijn als de timer zelf het water in de gaten houdt. Temperatuursensor? Luisteren naar het geluid? Vast ingestelde timer? Dat zien we later wel. Eerst maar een werkende 'Torens van...' bouwen.

Ik besloot een prototype te maken met iets eenvoudigs, zoals de Meccano-set die ik had gekocht toen ik met Dr. Günter Spanner aan zijn boek *Arduino: Circuits and Projects Guide* (Elektor, 2013) werkte. Door dat boek had ik zelfs de smaak te pakken gekregen van het bouwen van eenvoudige mechanische structuren (**figuur 3**), dus ik wilde een *Meccanotype* van mijn project. Lasersnijden van mooie onderdelen kan later.

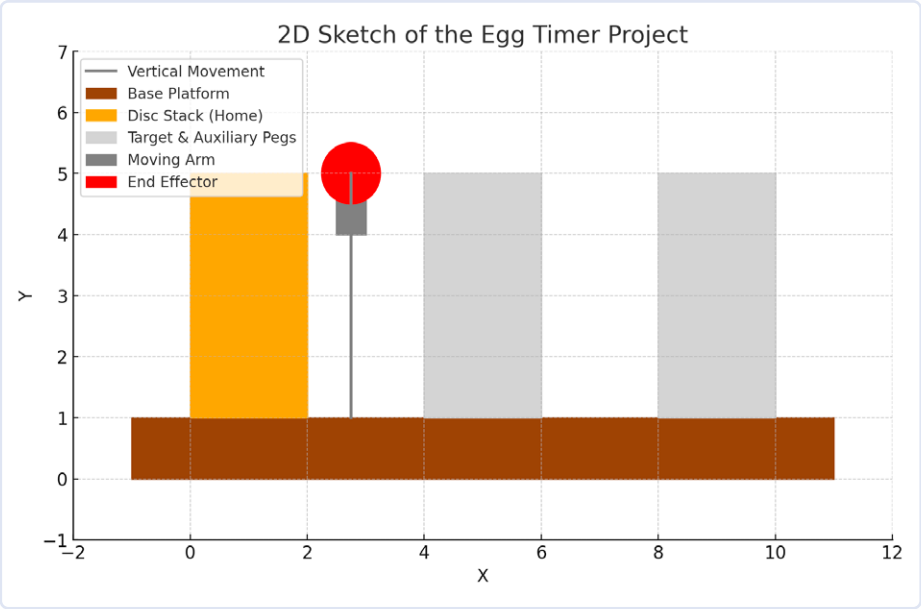
Visualiseren

De mogelijkheid om visualisaties te tonen is wat GPT-4 onderscheidt van eerdere versies, dus nu vroeg ik om me te tonen hoe het eruit zou gaan zien. Ik kon kiezen tussen een 2D-schets, een stroomdiagram of een conceptschets, en ik koos het laatste. De uitvoer maakte echter bepaald geen 'intelligente' indruk (**figuur 4**).

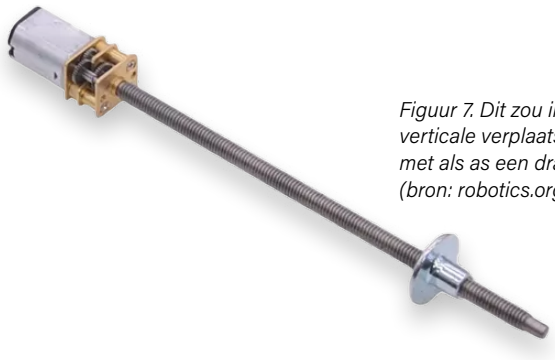
Daar kon ik helemaal niks mee, dus ik hoopte dat een 2D-schets meer zou lijken op waar we het eigenlijk over hadden. Maar die was nauwelijks beter (**figuur 5**); de schijven (allemaal even groot?) ziten niet eens op één van de pennen! Met wat correcties kwamen we uit op **figuur 6**, maar tegen die tijd had ik zo half en half besloten dat visualisaties geen groot succes zouden zijn, in elk geval niet met mijn invoer.



Figuur 5. En de 2D-schets was niet veel beter.



Figuur 6. Na deze verbeterde 2D-schets heb ik het visualisatie-idee maar laten varen.



Figuur 7. Dit zou ik kunnen gebruiken voor de verticale verplaatsing: een N20 micromotor met als as een draadeind van 100 mm (bron: robotics.org.za/N20-500-L100-6V).

Ik kwam nog even terug op mijn besluit toen hij me een 'visualisatie' aanbood in de vorm van een bestand zonder extensie dat ik kon downloaden. Dat geheimzinnige bestand intrigeerde me genoeg om het te willen onderzoeken.

Op dit punt aangekomen besloot ik om een servo te gebruiken voor de roterende basis en een robotgrijper voor het vastpakken van de schijven. Kort voordat mijn tokens op waren, hadden we het nog over welk lineaire mechanisme te gebruiken; ik vroeg met name naar een N20-motor (500 rpm, 6 V) met een M4-draadeind van 100 mm (**figuur 7**).

Wordt vervolgd...

Toen waren niet alleen mijn tokens op, maar ik had ook voldoende materiaal voor deze aflevering. Maar we gaan verder. Ik ben aan een project begonnen dat met mijn kennis van alleen elektronica niet op te lossen is, dus het blijft een uitdaging. Volgende keer kom ik met een update over de voortgang!

230181-C-03 (vertaling: Evelien Snel)

Over de auteur

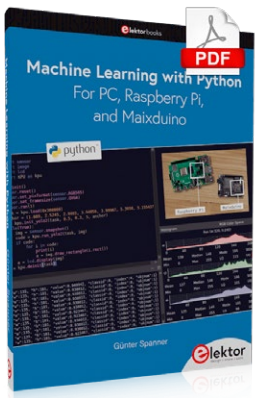
Brian Tristam Williams is altijd gefascineerd geweest door computers en elektronica sinds hij zijn eerste 'microcomputer' kreeg toen hij 10 was. Zijn reis met Elektor Magazine begon toen hij op zestienjarige leeftijd het blad voor het eerst kocht. Sindsdien bleef hij de wereld van elektronica en computers onderzoeken en leren. Hij ging in 2010 voor Elektor aan de slag; tegenwoordig houdt hij de nieuwste trends in de techniek in de gaten, in het bijzonder op het gebied van kunstmatige intelligentie en enkelkaarcomputers zoals de Raspberry Pi.

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen hebt naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via brian.williams@elektor.com.

Gerelateerd product

- **Dr. Günter Spanner, Machine Learning with Python for PC, Raspberry Pi, and Maixduino (E-book), Elektor 2022**
  www.elektor.nl/20150



WEBLINKS

[1] Torens van Hanoi bij Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Tower_of_Hanoi
[2] Torens van Hanoi bij Maths is Fun: https://mathsisfun.com/games/towerofhanoi.html
[3] Discussie met ChatGPT over dit project: https://tinyurl.com/chatgpthanoi
[4] Midjourney - Generative AI image tool: https://midjourney.com

Brussel innoveert

steun voor deep tech

Illustration: Midjourney

Priscilla Haring-Kuipers (Nederland)

Het is bekend dat Europa uitstekende wetenschappers heeft, maar als het gaat om het op de markt brengen van ideeën, zijn andere regio's in de wereld toonaangevend. Om dit te ondervangen werd in 2021 de European Innovation Council (EIC) opgericht. Ik sprak in Brussel met Isabel Obieta (EIC Program Manager for Responsible Electronics) en Francesco Matteucci (EIC Program Manager for Advanced Materials for Energy & Environmental Sustainability) over hoe de EIC ethische innovatie ondersteunt.

Priscilla: Wat is de Europese innovatieraad?

Francesco: De EIC is in 2021 opgericht vanuit de behoefte om een Europese paradox te ondervangen; We hebben in Europa de beste wetenschappers, maar niet de beste wetenschappelijke ondernemers. Wij zijn een 'one-stop-shop'-bureau wat inhoudt dat we het innovatietraject van deep-tech innovatoren ondersteunen van idee tot markt via drie financiële regelingen: *Pathfinder*, *Transition* en *Accelerator*, inclusief het EIC Fonds, dat investeert in begunstigde ondernemingen. Er zijn twee soorten inschrijvingen mogelijk bij het EIC; de ene is toegankelijk voor alle soorten deep-tech voorstellen, de andere is gericht op de uitdagingen die geïdentificeerd zijn en gesteund worden door de programmamanagers.

Priscilla: Wat is je taak als programmamanager?

Isabel: Ieder van ons heeft een eigen achtergrond en brengt een eigen visie naar het IEC. Wij beslissen niet wat gefinancierd wordt maar we zoeken bedrijven waarvan we denken dat ze relevant zijn en brengen die met elkaar in contact. In Pathfinder volg ik twintig projecten, in Transition vijf of zes en in Accelerator ongeveer tien. Ik wil echt tot de kern van de elektronica doordringen en bereiken dat apparaten duurzamer worden, waarvoor ik tot de wortels moet doordringen.

Francesco: We zijn onderdeel van de gemeenschap rond ons onderwerp en we helpen deze om te groeien, te innoveren en een impact te maken op sociaaleconomisch gebied. We blijven voor een beperkte duur (maximaal vier jaar) betrokken en ondersteunen initiatieven van 50...100 miljoen euro met betrekking tot specifieke onderwerpen. Ik lees veel publicaties en ontmoet veel onderzoekers, ontwikkelaars en financieel experts om een goed beeld te krijgen van de toekomst van mijn gebied. Ik steun de projecten in mijn portfolio op wetenschappelijk gebied en voorkom dat het wiel steeds opnieuw wordt uitgevonden. Ik ontmoet projectpartners en help hen een netwerk van investeerders, bedrijfsmanagers en getalenteerde personen te bouwen. Ik zie het als mijn verantwoordelijkheid om jonge wetenschappers en ondernemers te laten begrijpen dat het werk dat ze doen daadwerkelijk veranderingen teweeg kan brengen.

Isabel: We zijn open en toegankelijk; we gaan naar veel netwerkbijeenkomsten waar mensen direct met ons in contact kunnen komen; velen maken daar gebruik van. We ontdekken wie is wie op ons gebied en steunen projecten bij hun ontwikkeling. Soms gaat het om fundamenteel onderzoek en ook dan moeten we de wetenschappelijke achtergrond begrijpen. Ik denk dat dat belangrijk is omdat we allen expert op ons eigen terrein zijn, zodat we inhoudelijk kunnen meepraten en daadwerkelijk iets kunnen bijdragen.

Figuur 1. Isabel Obieta.

Figuur 2. Francesco Matteucci.

Francesco: Onze rol hangt niet alleen af van onze ervaring en het onderwerp, maar ook op de interactie met de begunstigde. Er hangt veel af van die één-op-één relatie en volgens mij maakt dat ons werk zo bijzonder. We organiseren ook bijeenkomsten met de Europese onderzoeksraad: zij zorgen voor de Nobelprijswinnaars en wij voor de investeerders, bedrijven en ondernemers.

Priscilla: Wat zijn op jullie terrein de ontwikkelingen op het gebied van ethiek?

Isabel: Ik vind radicale vernieuwingen in chips door het gebruik van nieuwe materialen een uitdaging. Er werken al mensen met organische elektronica wat radicaal vernieuwend zou kunnen worden. Silicium helemaal vervangen is niet mogelijk, maar voor sommige chips kunnen we additieve in plaats van subtractieve processen gebruiken of minder materiaal gebruiken.

Francesco: We spreken veel over duurzaamheid en dan vooral over de sociaaleconomische impact van elektronica. Ik denk dat we de kern-prestatie-indicatoren (knowledge performance indicators, KPI) rond elektronica goed in kaart moeten brengen om van daaruit de toegevoegde waarde van ethiek zichtbaar te maken.

Isabel: Ik voorzie dit jaar grote veranderingen. Er komt veel druk vanuit de politiek, maar ook het bewustzijn in de halfgeleiderindustrie groeit. Ik ben optimistisch.

Priscilla: Wat is de belangrijkste ethische uitdaging?

Isabel: Eén voorbeeld is de mens-georiënteerde Industry 5.0 waar we werknemers kunnen helpen hun werk beter te doen maar waar ze ook betrokken blijven bij hun werk. Ik denk dat het sociale aspect van elektronica belangrijk is, en we moeten blijven beseffen dat elektronica er is om ons te helpen bij onze manier van leven.

Francesco: Hebben we de holistische benadering overwogen vanuit het milieuaspecten? Zo ja, hebben we een KPI waar we oplossing A met oplossing B kunnen vergelijken? Om waterstof te maken is bijvoorbeeld veel zoet water nodig waardoor we een verdelingsvraag moeten beantwoorden: geven we Isabel water om te overleven of maken we waterstof om vliegtuigen te laten vliegen?

Isabel: Alles meetbaar maken. We willen allerlei sensoren die gewassen kunnen monitoren, maar is dat de investering waard en wat zijn de milieuaspecten van fabricage en het operationeel maken en houden ervan? We proberen technieken te ontwikkelen die zaken eenvoudig maar realistisch kunnen kwantificeren. Daarmee kunnen we ook bijdragen aan onze begunstigden en hun omgeving; hen helpen om de daadwerkelijke impact te bepalen van de veranderingen die zij vormgeven.

230489-03

Europese innovatieraad – totaal budget 10,1 miljard euro

"Europees kernprogramma om baanbrekende technologieën en innovaties te herkennen, te ontwikkelen en op te schalen" omvat drie financieringsregelingen:

- *Pathfinder:* onderzoek en deep tech-projecten, wetenschappelijk georiënteerd en met veel risico –maximaal 4 mijloen euro per project.
- *Transition:* ontwikkeling en validering van nieuwe ideëen van lab tot bedrijf – maximaal 2,5 miljoen euro per project.
- *Accelerator:* ondersteuning van SME's bij het ontwikkelen en opschalen naar nieuwe markten of bestaande markten open te breken – maximaal 2,5 miljoen euro per project.

WEBLINKS

[1] Isabel Obieta, Programme Manager for Responsible Electronics: https://eic.ec.europa.eu/isabel-obieta_en

[2] Francesco Matteucci, Programme Manager for Advanced Materials for Energy & Environmental Sustainability: https://eic.ec.europa.eu/francesco-matteucci_en

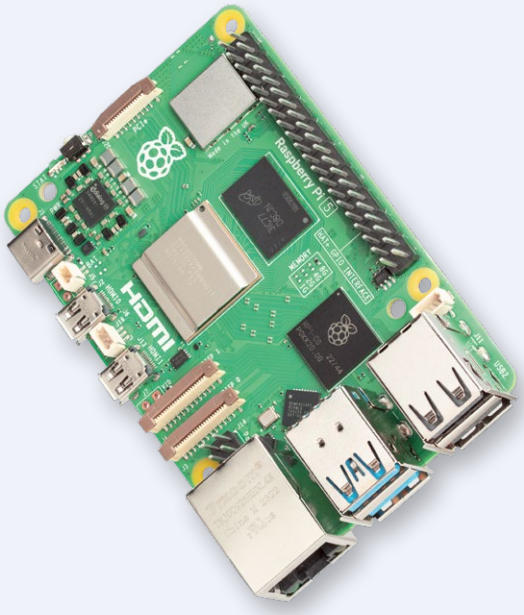
[3] European Innovation Council: https://eic.ec.europa.eu/index_en

De Elektor Store

nooit duur, altijd verrassend!

De Elektor-store heeft zich ontwikkeld van de community-shop voor de eigen producten van Elektor (boeken, tijdschriften, kits en modules) tot een volwassen webshop die veel waardevolle elektronica-aanbiedingen heeft.

We bieden hier producten aan waar we zelf enthousiast over zijn of die we gewoon willen uitproberen. Suggesties zijn altijd welkom (sale@elektor.nl).



Raspberry Pi 5 (8 GB RAM)

De nieuwe Raspberry Pi 5 levert meer prestaties dan ooit tevoren. Dankzij de snellere CPU, GPU en RAM is de Raspberry Pi 5 tot 3x sneller dan zijn toch al snelle voorganger. Naast de snelheidsboost biedt de Raspberry Pi 5 (die beschikt over het nieuwe Raspberry Pi RP1-silicium voor geavanceerde I/O-mogelijkheden) voor het eerst ook de volgende functies: RTC, een aan/uit-knop en een PCIe-interface.

Prijs: € 94,95

www.elektor.nl/20599

Mastering the Arduino Uno R4

Gebaseerd op de goedkope 8-bit ATmega328P-processor, scoort het Arduino Uno R3-board waarschijnlijk als het meest populaire Arduino-familielid tot nu toe, en dit werkpaard is al vele jaren beschikbaar. Onlangs is de nieuwe Arduino Uno R4 uitgebracht, gebaseerd op een 48 MHz, 32-bit Cortex-M4-processor met een enorme hoeveelheid SRAM en flash-geheugen. Bovendien zijn een ADC met hogere precisie en een nieuwe DAC aan het ontwerp toegevoegd. Het nieuwe board ondersteunt ook de CAN-bus met een interface.

Prijs: € 34,95

Ledenprijs: € 31,46

www.elektor.nl/20619

Joy-Pi Advanced – Ontwikkelplatform voor Raspberry Pi, Arduino en ESP32

Prijs: € 369,00

Ledenprijs: € 332,10

www.elektor.nl/20589

PiKVM V4 Plus – KVM over IP voor Raspberry Pi CM4

Prijs: € 449,00

Ledenprijs: € 404,10

www.elektor.nl/20580

Raspberry Pi Pico Advanced Kit met 32 modules en 32 projecten

Prijs: € 59,95

Ledenprijs: € 53,96

www.elektor.nl/20581

CrowVi 13.3" IPS HD Touch Display (1920x1080)

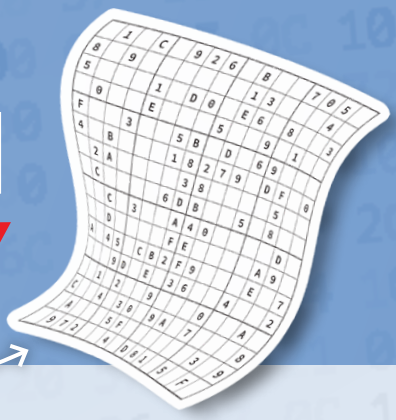
Prijs: € 199,95

Ledenprijs: € 179,96

www.elektor.nl/20583

Hexadoku

puzzelen voor elektronici



PC, oscilloscoop en soldeerbout kunnen weer even op adem komen terwijl u uw hersenen pijnigt met onze Hexadoku. De instructies voor deze puzzel zijn heel eenvoudig. De Hexadoku werkt met de hexadecimale cijfers 0 t/m F, helemaal in de stijl van elektronici en programmeurs.

Vul het diagram van 16 x 16 hokjes zodanig in dat **alle** hexadecimale cijfers van 0 t/m F (dus 0...9 en A...F) precies éénmaal voorkomen in elke rij, in elke kolom en in elk vak van 4 x 4 hokjes (gemarkeerd door de dikkere zwarte lijnen). Een aantal cijfers is al aangegeven en deze bepalen de uitgangssituatie voor de puzzel.

Onder de inzenders met de goede oplossing verloten we vijf waardebonnen. Om mee te dingen naar een van deze prijzen dient u **de cijfers in de grijze hokjes** naar ons op te sturen.

Doe mee en win!

Onder de internationale inzenders met het juiste antwoord verloten we vijf Elektor-waardebonnen, elk ter waarde van **50 Euro**.

Het is dus zeker de moeite waard om mee te doen!

Stuur uw antwoord (de getallen in de grijze hokjes) vóór **15 december 2023** naar:

hexadoku@elektor.nl

DE PRIJSWINNAARS

De juiste oplossing van de Hexadoku uit het september/oktober-nummer 2023 is: **013BE**.
Oplossingen die ons vóór 15 oktober 2023 hebben bereikt, deden mee aan de trekking van vijf Elektor-waardebonnen.
De winnaars zijn bekendgemaakt op www.elektormagazine.com/hexadoku.
Allemaal van harte gefeliciteerd!

	4	2		D	9					6	0		B	E	
				1	4	6			A	7	E				
	7	E	1	0		2			C		F	9	3	D	
B					A	7	F	9	D	1					6
2	9	4	5	8							C	D	E	7	B
7		A	B	4							6	8	F		C
D			8	7	3	9			B	5	A	1			0
	0			B	C					E	4			9	
	A			F	7					B	1			C	
9			4	5	1	8			3	F	7	B			E
3		6	7	9							5	F	1		4
C	F	1	2	3							9	5	8	0	7
E					B	3	8	1	4	A					9
	1	C	3	A		5			9		8	6	7	B	
				6	F	E			7	C	3				
	8	9		C	0					2	B		A	4	

D	A	E	3	F	B	1	5	8	C	2	6	4	0	9	7
B	F	6	0	C	E	A	7	D	5	9	4	8	1	2	3
4	1	5	8	3	2	0	9	E	7	B	F	6	A	C	D
2	7	9	C	6	D	8	4	A	0	1	3	B	E	5	F
9	0	B	E	7	4	5	6	F	D	8	1	3	2	A	C
3	2	4	6	9	1	C	A	0	B	5	7	D	F	E	8
7	C	A	D	8	3	B	F	9	4	E	2	5	6	0	1
5	8	1	F	D	0	2	E	C	3	6	A	7	9	B	4
6	3	F	9	B	5	7	D	1	E	A	C	2	4	8	0
8	4	0	1	E	F	3	C	2	6	7	5	9	B	D	A
A	5	D	B	4	8	6	2	3	F	0	9	C	7	1	E
C	E	2	7	0	A	9	1	B	8	4	D	F	3	6	5
F	9	C	2	A	6	D	0	4	1	3	8	E	5	7	B
E	D	7	A	1	9	4	3	5	2	C	B	0	8	F	6
0	B	3	5	2	7	F	8	6	A	D	E	1	C	4	9
1	6	8	4	5	C	E	B	7	9	F	0	A	D	3	2

Medewerkers van Elektor International Media en hun familieleden zijn van deelname uitgesloten.

Electronic Components

TRANSFER
MULTISORT
ELEKTRONIK

GLOBAL DISTRIBUTOR OF ELECTRONIC COMPONENTS

Wil je niet meer wachten op een standaard PI-board?

Kom meer te weten

Probeer Banana!

Transfer Multisort Elektronik B.V.
Eindhoven, tme@tme-benelux.nl

Sluit u bij ons aan:

tme.eu

YOU NEED IT, WE HAVE IT!

tme.com

Ontwikkelingstools op één plaats

Duizenden tools van honderden vertrouwde fabrikanten

Maak een keuze uit onze uitgebreide selectie op
nl.mouser.com/dev-tools

MOUSER ELECTRONICS