

Accusysteem voor zonne-energie

bouw uw eigen energie-opslag voor zonnepanelen

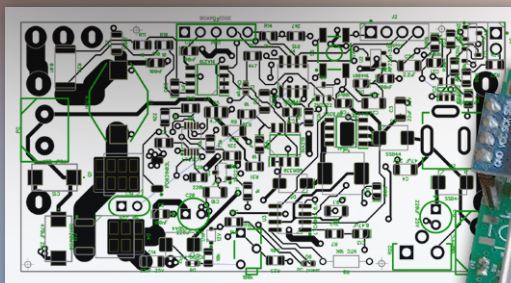
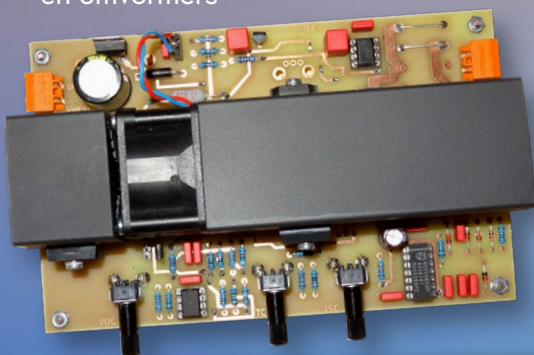


FOCUS OP

Energie & Vermogen

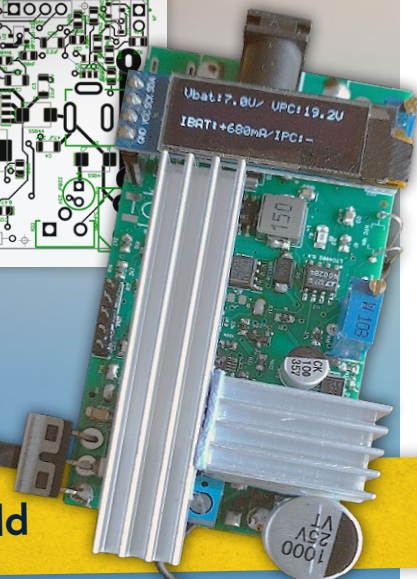
Simulator voor zonnepanelen

test en optimaliseer MPP-trackers en omvormers

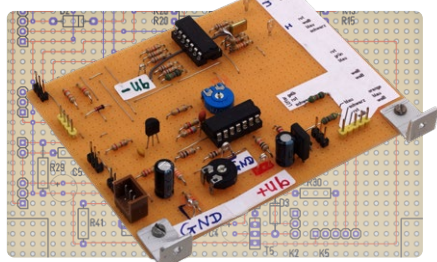


Powerbank voor notebook

geef uw oude laptop een tweede leven



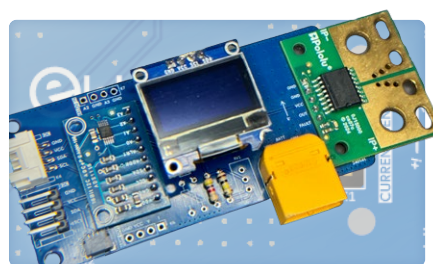
STM32 Edge AI Contest – € 5.000 aan prijzengeld



Elektronische belastingweerstand
test accu's en zonnepanelen

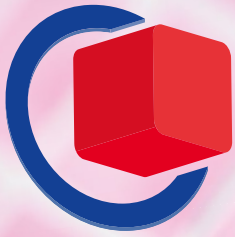


Vorstbescherming voor fruitbomen
met temperatuurlogger



Project-update: AmpVolt v2.0
meet 100 A en meer!





embeddedworld

Exhibition & Conference

CONNECTING THE
EMBEDDED COMMUNITY

11 – 13.3.2025

NUREMBERG, GERMANY



Get your
free ticket now!

embedded-world.de/codes

Use the voucher code **ELE4ew25**

Media partners

elektroniknet.de

Markt&Technik
Die unabhängige Wochenzeitschrift für Elektronik

Elektronik

Elektronik
automotive

Elektronik
•medical

connect
professional

NÜRNBERG / MESSE

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/advertiser

Auteursrecht

© Elektor International Media B.V. - 2025

Niets uit deze uitgave mag veeleer openbaar 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 Rijsoctrooiwet 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 ongevrraagd 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



Jens Nickel

Hoofdredacteur Elektor Magazine



Kiezen is moeilijk

Collega's leveren een bijdrage aan elk nummer van Elektor, net als externe deskundigen die het hele jaar door artikelen over verschillende elektronicathema's verzorgen. Een groot deel van elk nummer wordt echter gevuld door auteurs uit de community die ons slechts af en toe nieuwe suggesties sturen. Bij het plannen van een uitgave kijk ik naar een lijst met ideeën voor artikelen die we goed vinden, en voor deze uitgave, 'Energie & Vermogen', heb ik dat ook gedaan. Ik was verbaasd hoeveel geschikte projecten er op de lijst stonden! Helaas is de ruimte in ons tijdschrift beperkt en kon ik maar een paar goed uitgewerkte suggesties opnemen, zoals een elektronische belasting (p. 94), een simulator voor zonnepanelen (p. 14) en een powerbank voor notebooks (p. 32). Dit laat zien hoe populair het onderwerp energie is bij elektronica-engineers. De hausse op het gebied van zonne-energie en de steeds goedkopere Li-Ion accutechnologie hebben er zeker toe bijgedragen dat steeds meer mensen geïnteresseerd raken in de onderwerpen stroomopwekking/opslag/omzetting/meting.

Op dit punt – en ook passend aan het begin van een nieuw jaar – wil ik graag mijn dank uitspreken voor de bijdragen uit onze community! Mijn collega's en ik bespreken de inzendingen tijdens vergaderingen en zijn altijd weer onder de indruk van de geweldige ideeën en professionele documentatie! Omdat we het luxe-probleem hebben om zoveel inzendingen te ontvangen, kunnen we slechts een paar goede projecten accepteren. Het is niet gemakkelijk voor ons om een ingenieus ontworpen speciaal domoticasysteem of professioneel gefabriceerd meetapparaat te moeten afwijzen, alleen omdat we denken dat ze slechts voor een zeer kleine groep lezers interessant zijn. Overigens is ons Elektor Labs-projectplatform bij uitstek geschikt voor zulke ietwat exotische projecten en ideeën (www.elektormagazine.com/labs). Ik weet uit eigen ervaring hoezeer het gewaardeerd wordt als u één, twee of drie mede-innovatoren vindt die bereid zijn om tips en advies te geven en misschien zelfs mee te werken aan het project.

Dus als u een project in de la hebt liggen, aarzel dan niet om het op Elektor Labs te publiceren. Suggesties kunt u ons natuurlijk ook per e-mail sturen via redactie@elektor.com. Kleine schakelingen en achtergrondartikelen over allerlei elektronica-onderwerpen zijn ook welkom!

Blijf uw bijdragen sturen – zeker in dit nieuwe jaar!



Deel met Elektor!

Uw elektronica-expertise is welkom! Hebt u een voorstel voor een artikel of een elektronica-tutorial op video, of een idee voor een boek? Bekijk onze gids voor auteurs en inzendingen op

www.elektormagazine.com/submissions

Elektor Labs: ideeën & projecten

Het Elektor Labs-platform is voor iedereen toegankelijk. Post elektronica-ideeën en -projecten, bespreek technische uitdagingen en werk samen met anderen op

www.elektormagazine.com/labs

Ons team

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

DHZ-accu- systeem voor zonne-energie

bouw uw eigen
energieopslag voor
zonnepanelen



Rubrieken

- 3 **Voorwoord**
- 73 **Alle begin...**
...filtert actief
- 100 **2025: een AI-odyssee**
enkele projecten voor het nieuwe jaar
- 110 **Project 2.0**
correcties, updates en brieven van lezers

Achtergrond en info

- 6 **DHZ-accusysteem voor zonne-energie**
bouw uw eigen energieopslag voor zonnepanelen
- 26 **Vergroten van de bandgap**
daarom is er zoveel interesse in SiC en GaN
- 52 **Het analoge ding**
de Arduino onder de analoge computers?
- 76 **Reduceer vermogensverlies met seriecondensatoren**
slim gebruik van capacitieve reactantie
- 80 **De betaalbare MCP4725 12-bit digitaal/analoog-omzetter**
EEPROM-functie zorgt voor veilig inschakelgedrag
- 84 **FNIRSI LCR-ST1 smart LCR-meetpincet**
- 88 **Elektor boeken**
Raspberry Pi-gebaseerd test- en meetlab

Projecten

- 14 **Simulator voor zonnepanelen**
test en optimaliseer MPP-trackers en omvormers
- 32 **Powerbank voor notebook**
geef uw oude laptop een tweede leven
- 42 **Vorstbescherming voor fruitbomen**
met temperatuurlogger
- 56 **Zuinige relaisdriver**
spaart 90% stroom
- 60 **Verbetering van de ET5410A+ DC-belasting**
blijf koel en stil
- 94 **Elektronische belastingweerstand**
voor stromen tot 10 A en meer
- 106 **Project-update: AmpVolt v2.0**
100 ampère en meer!
- 116 **Elektor Audio DSP FX Processor Board**
deel 2: toepassingen maken

Vergroten van de bandgap
daarom is er zoveel interesse
in SiC en GaN



26



Elektronische belastingweerstand tot 10 A en meer

94



Powerbank voor notebook

geef uw oude laptop
een tweede leven

32

Industry

- 22 **De STM32 Edge AI Contest**
ontdek de nieuwe STM32N6 en ding mee naar in totaal € 5000!
- 39 **Medische robots**
het overwinnen van technische en regelgevende barrières
- 64 **electronica 2024**
een terugblik
- 68 **Elektromagnetische compatibiliteit**
EMC in een notendop!
- 112 **Ethische transparantie ontsluit**
inzichten uit het Ethics in Electronics 2024 onderzoek

Binnenkort

Elektor maart/april 2025

Natuurlijk bereiden we weer een opwindende mix voor van projecten, schakelingen, achtergrondinfo en tips en trucs van en voor engineers en makers. De focus ligt daarbij op embedded en AI.

- > FMCUViewer: open source multiplatform debugging tool
- > FPGA-gebaseerde audiospeler met equalizer
- > ESP32-S3 gebaseerd sensor-evaluatieboard
- > Draadloze brievenbusbewaker
- > Maixduino AI-gestuurde automatische portier
- > Dual core-programmeren met een Raspberry Pi Pico
- > ECG-monitor

Elektor maart/april 2025 verschijnt omstreeks **12 maart 2025**.

Alle aankondigingen onder voorbehoud.

BONUS CONTENT

Lees ook de gratis **Energie & Vermogen** bonuseditie van Elektor!

- > Snelheidsregeling voor een DC-borstelmotor
- > 8-bit-maatje voor de Raspberry Pi
- > Vreemde onderdelen: kwikdampgelijkrichters
- > Infographics: energie en vermogen



[www.elektormagazine.nl/
energie-vermogen](http://www.elektormagazine.nl/energie-vermogen)



FOCUS OP

Energie & Vermogen

DHZ-accusysteem voor zonnepanelen

bouw uw eigen energieopslag voor zonnepanelen

Dr. Thomas Scherer (Duitsland)

De afgelopen jaren is de prijs van zonnepanelen enorm gedaald. Het installeren van zonnepanelen is dus vanzelfsprekend. Een groot nadeel van zonnepanelen is dat ze niet altijd stroom leveren. 's Nachts schijnt de zon niet. En in de winter of bij bewolkt weer wordt er veel minder energie geproduceerd. Als we een accu aan het systeem toevoegen, kunnen we veel meer profiteren van de stroom die we zelf opwekken. In dit artikel geven we wat algemene overwegingen en kijken we welke onderdelen een hobbyist heeft gekozen om zijn eigen 48V-accu te koppelen aan de zonnepanelen op zijn dak.

Na de golf van 'balkoncentrales' (kleine zonnestroomsystemen met één of twee panelen) die we onlangs hebben beschreven [1][2]), worden accusystemen nu steeds populairder. Dat is logisch, want energie uit zonlicht is niet altijd beschikbaar. Gemiddeld is het, overal ter wereld, de helft van de dag donker. De donkerstroom [3] of het licht van de maan en de sterren is te verwaarlozen, daar kunnen we niks mee. En overdag zit elke wolk in de weg voor de productie van zonne-energie. 's Winters zijn de dagen korter, dus ook dan is er minder energie beschikbaar, juist wanneer we die het meest nodig hebben. Even vooraf: we willen het hier niet hebben over accu's voor kleine



bron:
OpenAI en Studio Elektor

balkonpanelen. Op het ogenblik verdienen accu's zichzelf bij zo'n systeem niet terug. Dit artikel gaat over wat grotere, 'normale' thuisinstallaties, zoals die op daken worden geplaatst. Natuurlijk kunt u ook een accusysteem voor een balkonpaneel bouwen, maar de kostenbesparing in vergelijking met een in de handel verkrijgbare oplossing is te verwaarlozen. Bij een groter systeem ligt dat anders.

Energie opslaan

Het opslaan van overtollige energie die overdag wordt geproduceerd is een vanzelfsprekende oplossing. De energie staat dan klaar om te gebruiken op het moment dat hij nodig is. Zo kunt u meer van de energie die u zelf hebt opgewekt gebruiken en zo meer geld besparen. Natuurlijk gaat u dan ook minder stroom terugleveren. Nu de salderingsregeling op losse schroeven staat, is het zelf opslaan van de energie de meest toekomstzekere oplossing.

Een snelle inschatting toont al aan dat een accusysteem thuis tot een flinke besparing kan leiden. Als de terugleververgoeding bijvoorbeeld 10 cent per kWh bedraagt en het tarief voor geleverde stroom is 30 cent, dan bespaart u 20 cent per kWh als u alle energie die u opwekt zelf gebruikt en niets teruglevert. We hebben het één en ander nog eens doorgerekend in een conservatieve case study. Zie het kader **Besparing met een thuisaccu in Duitsland**.

Op papier bedraagt het voordeel van een goed gedimensioneerde thuisaccu slechts € 242 per jaar. U zult er dus niet snel rijk van worden. En dan hebben we in onze case study nog niet eens rekening gehouden

met de verliezen die bij het op- en ontladen optreden. Afhankelijk van de aanschafprijs van de accu kan het dus behoorlijk lang duren, voordat die zichzelf heeft terugverdiend. En misschien lukt dat zelfs helemaal niet. Als we uitgaan van een bescheiden rente van 3% zou u jaarlijks € 242 rente moeten ontvangen voor hetzelfde rendement. Als de accu en de installatie (inclusief de hogere prijs van een omvormer die geschikt is voor een accu) € 8000 kosten, dan gaat u dat waarschijnlijk niet terugverdienen. In dat geval betaalt u alleen maar voor autonomie en voor het prettige gevoel dat u zuinig omspringt met energie.

Een zonnestelsel met een thuisaccu heeft ook het voordeel dat u kunt beschikken over stroom als het lichtnet uitvalt. De meeste omvormers die geschikt zijn om een accu aan te sluiten, hebben ook een stopcontact van waaruit u essentiële apparaten, zoals de verwarmingsketel, de vriezer en uw internetrouter kunt voeden. Dat kan een hoop veiligheid en comfort opleveren.

Basisprincipes

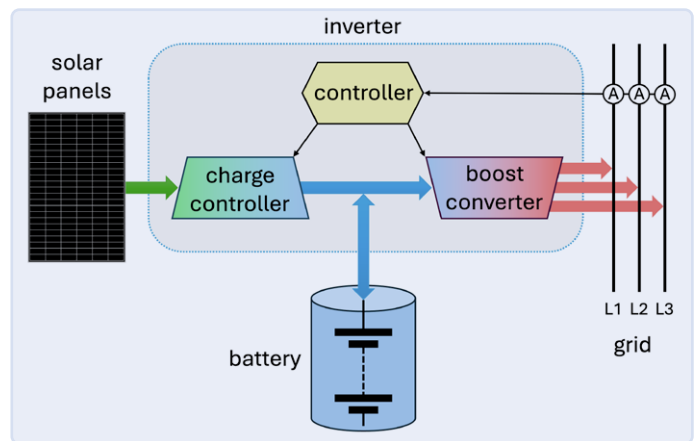
Een PV-systeem met thuisaccu is meestal opgebouwd zoals in **figuur 1**. Een omvormer met een accu-aansluiting bevat een ladingsregelaar, die ervoor zorgt dat alle overtollige energie bij voorkeur naar de accu gaat, in plaats van te worden teruggeleverd aan het net. Als de panelen bijvoorbeeld 7 kW leveren, terwijl het huishouden maar 1 kW gebruikt, dan kan de resterende 6 kW naar de accu. Mits de ladingsregelaar zoveel stroom aankan en de accu voldoende capaciteit heeft om de energie op te nemen.

Het ladingsniveau is een andere belangrijke factor. Als de accu al voor 95% vol is, kan hij geen 6 kW absorberen, zelfs niet als hij normaal gesproken 10 kW aankan. Bij deze ladingstoestand kan hij waarschijnlijk hooguit 1 kW verwerken. In dit geval, waar 1 kW wordt gebruikt door het huishouden en de accu slechts 1 kW kan absorberen, wordt de resterende 5 kW teruggeleverd aan het net. Na een uur of twee, als de accu helemaal vol is, wordt al het overtollige vermogen, in dit geval 6 kW, teruggeleverd aan het net. 's Nachts, als de zonnepanelen geen stroom leveren, kan de boost converter in de omvormer opgeslagen energie uit de accu aan het huishouden leveren.

Om dat soepel te laten werken, moeten er sensoren worden geïnstalleerd in het systeem. Met die sensoren kan de omvormer detecteren hoeveel vermogen er wordt geëxporteerd naar of geïmporteerd uit het lichtnet. 's Nachts werkt de omvormer dan in 'zero feed-in'-modus. Die zorgt ervoor dat er precies genoeg vermogen wordt overgedragen van de accu naar het huishouden, zodat er niets wordt teruggeleverd aan het net. Uit ecologische overwegingen kan het zinvol zijn om het energienet te helpen door 's nachts zelf opgewekte energie te delen, maar financieel is dat niet aantrekkelijk. De terugleververgoeding (Feed in Tariff) weegt meestal niet op tegen de slijtage van de accu.

Bij een verwachte levensduur van ca. 8000 laadcycli en een prijs van € 4000 voor een 10kWh-accu kost elk kilowattuur dat via deze accu geleverd wordt ongeveer 5 cent. En dan rekenen we de installatiekosten nog niet eens mee. Daar komt nog eens bij dat, als de accu al vroeg in de avond leeg is, er geen energie meer over is voor het eigen huishouden. Die moet dan voor het volle tarief van het lichtnet worden geïmporteerd, waarmee het hele voordeel van de thuisbatterij wordt tenietgedaan.

De meeste losse accu's voor balkoncentrales (met een capaciteit van ongeveer 2 kWh) monitoren het energieverbruik van het huishouden



Figuur 1. Blokschema van een PV-systeem met accu.

niet, dus die kunnen alleen een constant vermogen leveren, meestal tussen 100 en 500 W. Dat past niet bij het veranderlijke energieverbruik van de meeste huishoudens.

Keuze van de accu

Als u een accu wilt toevoegen aan uw PV-systeem, hebt u een omzetter nodig die daar geschikt voor is, anders moet u die later alsnog installeren. In het algemeen zult u moeten kiezen tussen een 'high-voltage'- of een 48V-accu. Hoogspanningsaccu's werken op veel meer dan 48 V, meestal tussen 150 V en 400 V. De meeste fabrikanten van omvormers leveren compatibele hoogspanningsaccu's, meestal met gepatenteerde technologie. In **figuur 2** ziet u bijvoorbeeld een stapelbaar 10kWh-model van BYD met een nominale spanning van 204 V, de prijs is iets minder dan € 1 per Wh. Hoogspanningsaccu's zijn meestal gemakkelijk



Figuur 2. Een hoogspanningsaccu van 11 kWh van BYD (bron: BYD [7]).

Besparing met een thuisaccu in Duitsland

Welke besparing kunnen we met een thuisaccu bereiken voor een gemiddeld driepersoonshuishouden in Duitsland, met behulp van zonnepanelen met een capaciteit van 10 kW en een jaarlijks elektriciteitsverbruik van 3,5 MWh? Op basis van de tabel van Duitse teruglevertarieven weten we dat we 12,73 cent per kWh zouden krijgen als we alle gegenereerde elektriciteit zouden terugleveren aan het net. Als we het alleen daarvan zouden moeten hebben, betalen we veel meer voor de stroom die we afnemen dan we ontvangen voor de teruggeleverde stroom. Het wordt pas de moeite waard als de extra opbrengst van het terugleveren meer is dan de kosten van de stroom die we moeten afnemen. Dat is alleen mogelijk met een veel groter systeem, waarvoor aanzienlijk meer dakoppervlak nodig is dan de meeste eengezinshuizen hebben.

De meeste huishoudens in Duitsland gebruiken een partial feed-in opstelling, die een lagere vergoeding van 8,03 cent per kWh oplevert. Voor geleverde stroom vragen de energieleveranciers in 2024 ongeveer 30 cent per kWh, dus elk zelf gebruikte kWh bespaart meer dan 22 cent.

In Duitsland is een typische energieopbrengst van zonnepanelen ongeveer 950 kWh per jaar per kW geïnstalleerde capaciteit. Dat wil zeggen dat een 10kW-systeem ruwweg 9500 kWh per jaar zou moeten produceren. Het zelf-verbruik varieert, maar zo'n 20% is een redelijke schatting. Dan zou u dus ongeveer 1900 kWh zelf verbruiken. Bij een kostenbesparing van 30 cent per kWh niet ingekochte stroom, staat dat gelijk aan een jaarlijkse besparing van ruwweg € 570. Daar mogen we de opbrengst van de 80% teruggeleverde energie bij optellen: 7600 kWh voor 8,03 cent per kWh. Dat levert nog eens € 610 per jaar op. In totaal levert een zonnestelsel van 10 kW dus ongeveer € 1180 per jaar op.

Laten we dat vergelijken met het voordeel van een systeem met thuisaccu. Een goed gedimensioneerde accu met een effectieve regeling kan het zelf-verbruik van energie in theorie meer dan verdubbelen. Bij een 10kW-systeem met een jaarlijks verbruik van 3500 kWh zult u waarschijnlijk niet meer dan 85% zelf-verbruik halen. Met een accu zou het zelf-verbruik toenemen van 1900 kWh per jaar naar ca. 3000 kWh. Dat bespaart 1100 kWh per jaar extra, dat is ongeveer € 330. Maar u levert ook 1100 kWh minder terug, dus de terugleververgoeding gaat omlaag naar ongeveer € 522 per jaar. Met een thuisaccu wordt de totale jaarlijkse besparing dus € 1422, slechts € 242 meer dan bij een systeem zonder accu.

Teruglevertarieven in Duitsland

Geïnstalleerd vermogen	Partial Feed in	Full Feed in
≤10 kW	8,03 c/kWh	12,73 c/kWh
≤40 kW	6,95 c/kWh	10,68 c/kWh
≤100 kW	5,68 c/kWh	10,68 c/kWh

aan te sluiten, maar u bent helemaal afhankelijk van de informatie die de omvormer u levert over de ladingstoestand. Hoogspanningsaccu's zijn vaak 'stapelbaar', dat wil zeggen dat u klein kunt beginnen en later capaciteit kunt toevoegen. Het voordeel is dat u een betrouwbare, gegarandeerde oplossing krijgt, zonder dat diepgaande kennis van de technische details nodig is. Dankzij een flinke prijsdaling in de afgelopen drie jaar kost een 10kWh-hoogspanningsaccu nu tussen € 3000 en € 10.000.

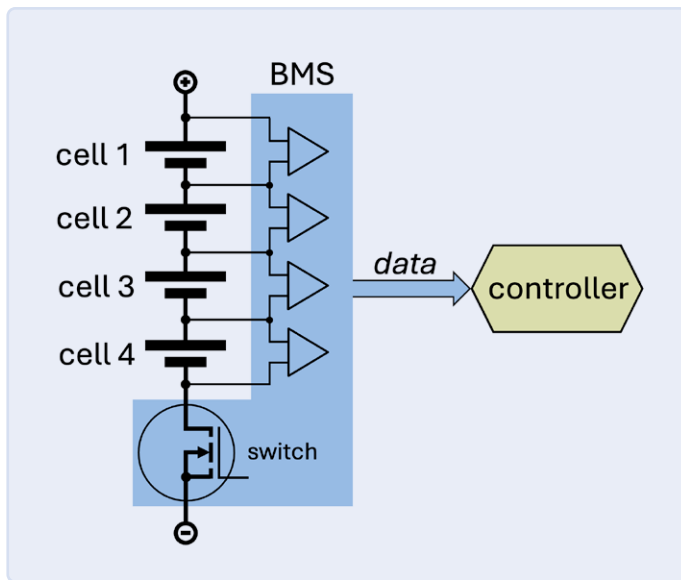
Sommige fabrikanten produceren omvormers voor standaard 48V-accusystemen, die meestal goedkoper zijn, omdat er meer concurrentie is in de markt. Het 10kWh-systeem in **figuur 3** maakt bijvoorbeeld gebruik van vier 50Ah-accu's van Eco-Worthy en kost zo'n € 2000. Voor een gemiddeld driepersoonshuishouden zou dit systeem zichzelf terugbetalen in ongeveer acht jaar (10 jaar als we rekenen met een rentepercentage van 3%). Na 10 jaar zal de accu waarschijnlijk tussen de 500 en 1000 cycli gemaakt hebben, dus die zal eerder defect raken door veroudering dan door te intensief gebruik.

Maar het kan ook anders: als u de accu's in China koopt, zelf een Battery Management System (BMS) toevoegt en alles in een kast inbouwt, kunt u een 48V-accu met een capaciteit van 10kWh bouwen voor minder dan € 1000. Die doe-het-zelf-oplossing kan zichzelf terugverdienen in vier à vijf jaar, en dan is zelf bouwen een aantrekkelijke mogelijkheid! We moeten ook kijken naar de accutechnologie: de lithium-ion-accu's met de grootste energiedichtheid (capaciteit in verhouding tot gewicht) zijn NMC-accu's (nikkel mangaan kobalt), die veel worden toegepast in elektrische voertuigen. Ze zijn duurder dan LiFePo-accu's (lithium ijzer fosfaat), ook bekend als LiFePO₄, die meer geschikt zijn voor statische thuisinstallaties, waar gewicht en volume minder belangrijk zijn. LiFePo-accu's hebben ook een levensduur van wel 8000 laadcycli, veel meer dan de ruwweg 1000 cycli van NMC-accu's. De grote maximale stroom van NMC-accu's is ook niet zo belangrijk voor een thuisinstallatie met zonnepanelen.

Ook de veiligheid is een groot voordeel van LiFePo-technologie. LiFePo-accu's zijn in het algemeen veel veiliger en verouderde NMC-accu's hebben vaak brand veroorzaakt [4]. Lithiumbranden zijn heftig, genereren giftige rook en zijn niet te blussen met water. Een grote NMC-accu in een woonhuis zou een gezondheids- en veiligheidsrisico zijn. Al met al kunnen we dus NMC-accu's beter vermijden en uitsluitend kiezen voor LiFePo-accu's.



Figuur 3. Een stack 48V-accu's van 50 Ah geschikt voor parallel aansluiten (bron: Eco-Worthy [8]).



Figuur 4. Principeschema van een accupack van 4 LiFePo-cellen (12 V) en een BMS.

Opmerkingen vooraf

Als we het hebben over '48V-accu's', bedoelen we eigenlijk accupacks met een nominale spanning van 51,2 V. Waarom? Elke LiFePo-cel heeft een nominale spanning van 3,2 V. In theorie zouden 15 cellen in serie een 48V-accu vormen, maar de packs bevatten 16 cellen in serie, zodat de klemspanning 51,2 V is. Een 48V-accu kan ook worden gemaakt door vier LiFePo-packs van 12 V in serie te schakelen. Deze 12V-accu's worden typisch gebruikt als een betere vervanging voor lood/zuur-accu's in de scheepsbouw en soortgelijke toepassingen. Een nominale spanning van 12 V zou vragen om 3,75 cellen in serie. Omdat dat niet kan, bestaat een LiFePo-accu van 12 V uit 4 cellen in serie. Ook een typische lood/zuur-accu voor auto's (die uit 6 cellen bestaat) heeft een spanning van 12,8 V als hij volledig is opgeladen, geen 12 V. Vier lood/zuur-accu's van 12 V in serie geven dus ook een nominale spanning van 51,2 V.

Lithiumcellen mogen we, in tegenstelling tot lood/zuur-cellen, niet zomaar in serie aansluiten. Lithiumcellen moeten altijd zorgvuldig gebalanceerd worden, omdat kleine verschillen in de ladingstoestand in de loop van de tijd accumuleren. We kunnen daarvoor zorgen met een BMS dat het ladingsniveau van elke cel in de gaten houdt en de verschillen wegwerkt met kleine vereffeningstromen. Een andere aanpak is gebruik te maken van een externe regelaar (bijvoorbeeld ingebouwd in de omvormer) om de cellen te monitoren, en die op zijn minst kan waarschuwen als er grote ladingsverschillen zijn, of soms speciale laad/ontlaadtechnieken kan inzetten om het evenwicht te herstellen.

Voor deze configuratie heeft het BMS een interface nodig die compatibel is met de regelaar in de omvormer. Een 48V-accupack is niet altijd zomaar in te pluggen; het moet wel compatibel zijn met de omvormer. Bij zelfbouwinstallaties moeten we wel een BMS kiezen dat compatibel of onafhankelijk is. In **figuur 4** ziet u de basisconfiguratie van een accupack met 4 cellen en een BMS. Voor deze stromen gebruiken we bij voorkeur N-kanaal MOSFET's vanwege hun betere eigenschappen. Ze koppelen de negatieve kant af als het BMS overlading of onderspanning detecteert. De dataverbinding naar een externe regelaar aan de rechterkant is niet nodig als we een zelfbalancerend BMS gebruiken.

Het is trouwens niet aan te raden om 48V-accu's in serie te schakelen tenzij er elektronica is (zoals die in de omvormer) die de ladingstoestand

van de packs uitbalanceert. Het mooiste zou zijn als één BMS alle cellen balanceert. Zelfs parallelschakelen van accu's is niet eenvoudig, hoewel het gemakkelijker is dan in serie schakelen. Als u accu's parallel schakelt, moet de omvormer (of speciale besturingselektronica) geschikt zijn om meerdere BMS-interfaces tegelijk aan te sluiten. Uiteindelijk is het eenvoudiger en veiliger om vooruit te denken en van het begin af aan te werken met een accu die voldoende capaciteit heeft.

Zelf bouwen

Het zelf bouwen van een 48V-lithiumaccupack uit individuele cellen is niet heel ingewikkeld, maar er zijn toch wel belangrijke dingen om rekening mee te houden, meer dan we hier kunnen beschrijven. Gelukkig zijn velen u al voorgegaan, dus in de online maker-community is veel informatie te vinden over dit onderwerp. Er is bijvoorbeeld een mooi verslag van dr. Oheimb [5]. En natuurlijk nog vele andere. Meer dan drie jaar geleden heeft mijn vriend Martin Jepkens (een fysicus en elektronica-hobbyist), een behoorlijk zwaar opslagsysteem voor zonne-energiesysteem met individuele cellen opgebouwd. Die installatie werkt nog steeds prima. Hij had zich eerst grondig verdiept in de accuwetenschap, en bestelde daarna 16 prisma'sche LiFePo-cellen via AliExpress.

Cellen

Het systeem bestaat uit 16 LiFePo4-cellen (**figuur 5**) met een capaciteit van 280 Ah. Samen vormen die een 51,2V-pack met een totale capaciteit van meer dan 14 kWh! Een dergelijk pack is tegenwoordig te koop voor ongeveer € 1000...€ 1500. Eigenlijk kunnen we het geen 'pack' meer noemen, want het geheel weegt meer dan 100 kg inclusief alle onderdelen en de behuizing. Enkele weken na het plaatsen van



Model: LiFePo4 3.2V 280AH	Rated Capacity: 280AH
Nominal Voltage: 3.2V	Max charge Voltage: 3.65V
AC Impedance Resistance: $\leq 0.25m\Omega$	Maximum Discharge Current: 1C
Charging Temperature: 0~60°C	Discharging Temperature: -30~60°C
Weight: $\leq 5.6Kg$	Dimensions(L*W*H): 173*71*204mm

Figuur 5. Technische details van de zestien 280-Ah LiFePo-cellen (bron: Martin Jepkens).



Figuur 6. De cellen werden geleverd in vier dozen met elk vier cellen (bron: Martin Jepkens).



Figuur 7. Het complete PV-accusysteem in de kelder (bron: Martin Jepkens).



Figuur 8. Screenshot van de bestelling voor het BMS van Jikong (bron: Martin Jepkens).

de bestelling ontving hij vier dozen, elk met vier goed beschermde cellen (figuur 6).

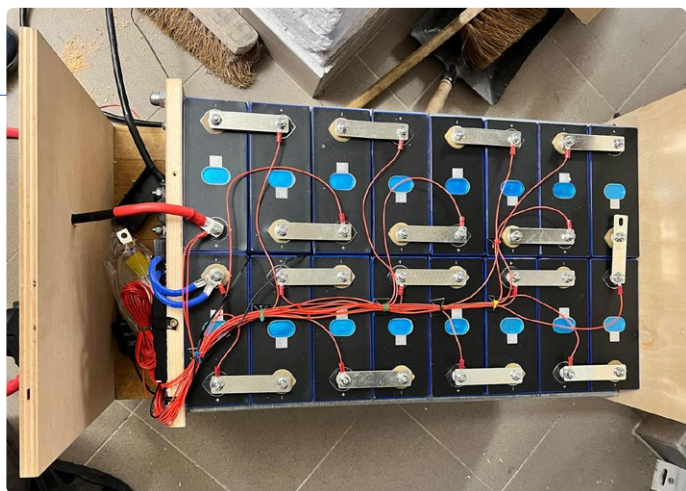
Deze prismatische LiFePo-cellen zijn verkrijgbaar in maten van minder dan 50 Ah tot veel meer dan 400 Ah. Als u nog meer capaciteit wilt, kunt u identieke cellen parallelschakelen. Als dit u inspireert om zelf zoiets te gaan bouwen, let dan wel goed op de kwaliteit! Koop alleen van verkopers met goede reviews en veel verkoop om te voorkomen dat u slechte cellen krijgt. Combineer alleen identieke cellen die zijn

gefabriceerd in dezelfde serie en met dezelfde productiedatum om te voorkomen dat ze bij het verouderen gaan verschillen. Natuurlijk hoeft u het niet zo groot aan te pakken als Martin; u kunt best beginnen met 100Ah-cellen om kosten te besparen. Voor een typische eengezinswoning is een zonne-accu met een capaciteit van 5 kWh een goed compromis, die zal 75% van uw energiebehoefte kunnen dekken. Een accu met die capaciteit is voldoende voor een gemiddeld nachtverbruik over 1,5 tot 2,5 dagen, meer in de zomer en soms minder in de winter. Als u energie wilt opslaan om langere spanningsuitval af te dekken en meer autonoom wilt zijn, geldt een eenvoudige regel voor de capaciteit: hoe groter hoe beter! De levensduur van grotere accu's is ook langer omdat ze minder zwaar belast worden.

De omvormer

Toen Martin zijn vrij bescheiden systeem met maar acht zonnepanelen ontwierp, heeft hij niet de gebruikelijke richtlijnen gevolgd. Hij heeft geen standaard omvormer met een extra accu-aansluiting gekocht, maar een modulair systeem samengesteld met componenten van Victron Energy in Nederland. Zij produceren veel professionele oplossingen voor scheepvaart en andere autonome systemen die open protocollen gebruiken.

In **figuur 7** ziet u het complete systeem in zijn kelder, inclusief de zelfgebouwde thuisaccu. Hij werkt met twee laadregelaars (één per vier zonnepanelen) om de accu op te laden, en de grote omvormer op de voorgrond is niet rechtstreeks verbonden met de zonnepanelen. Deze krijgt zijn stroom rechtstreeks uit de accu of indirect via de laadregelaars. In deze configuratie is de accu aan het einde van een zonnige dag in de zomer meestal volledig opgeladen. Let op de nette opbouw met dikke kabels (enkele tientallen mm² in doorsnede) en een



Figuur 9. De zonne-accu's in de behuizing (bron: Martin Jepkens).

zware rode isolatieschakelaar aan de linkerkant van de accubehuizing. Deze opbouw is bedoeld als voorbeeld van de basiskennis en ter inspiratie. We geven geen gedetailleerde instructies voor zelfbouw, of een onderdelenlijst. Als u deze modulaire benadering niet ziet zitten, of als u zelf niet weet hoe u het systeem moet dimensioneren en welke componenten daar bij horen, dan doet u er beter aan een standaard omvormer aan te schaffen, dat maakt alles een stuk eenvoudiger.

De Victron-modules communiceren met elkaar over een seriële bus en bevatten het BMS. Victron's software ondersteunt verschillende compatibele BMS-modellen, de data wordt via de RS485-interface gelezen en bewaakt. De Jikong BMS-controller (**figuur 8**) werd via AliExpress besteld bij een leverancier in Polen om problemen met de douane te voorkomen. Dit BMS heeft een RS485-interface, is geschikt voor stromen tot 300 A, en ondersteunt 8 tot 24 cellen. Voor minder dan € 50 is dat een mooie koop.

Installatie van de accu's

In **figuur 9** ziet u Martin's thuisaccu toen hij bijna voltooid was. Verschillende details vallen op. De kast is gemaakt van dik multiplex. De BMS-controller is aan de linkerkant gemonteerd. Dunne draden vormen de verbinding tussen het BMS en alle individuele cellen. Het bedraden moet zeer voorzichtig worden gedaan, want bij een kortsluiting met deze cellen kan er gemakkelijk 1 kA gaan lopen. Bij deze spanning zou bij kortsluiting een vlamboog ontstaan met een vermogen van tientallen kW in de vorm van hitte, licht en gesmolten metaal. De serieverbindingen tussen de cellen zijn gemaakt met behulp van metalen strips (vernikkeld koper), zie ook **figuur 10**.

Wat minder opvalt in **figuur 9** is dat er draadeinden langs de cellen lopen. Linksboven ziet u wel één van de vier borgmoeren. Het doel van deze stangen is, om de cellen voortdurend ingeklemd te houden, zodat ze niet kunnen gaan uitstulpen. Dat kan gebeuren tijdens het laden, ontladen of vanwege temperatuurvariaties. Hopelijk verlengt het inklemmen de levensduur. Het klinkt logisch, dus ik zou hetzelfde doen. Wat niet zichtbaar is in de figuren, is dat er voor de veiligheid een stevige, isolerende laag plastic tussen alle cellen is aangebracht. Met de in de behuizing ingeklemde cellen kan die extra veiligheid geen kwaad. De wanden van de cellen zelf zijn alleen maar een soort dunne krimpous.

Voordat het pack werd samengesteld, zijn alle cellen individueel getest met behulp van een elektronische belasting (**figuur 11**). Het bleek dat alle cellen zich keurig hetzelfde gedroegen. En dat doen ze jaren later nog steeds. **Figuur 12** is een screenshot van een besturingsapp op



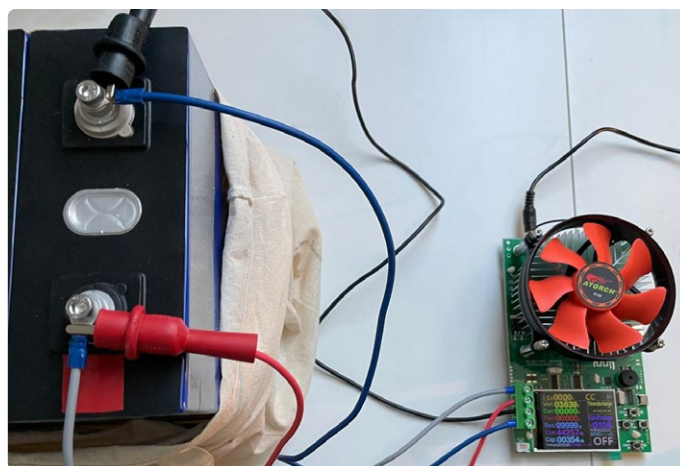
Figuur 10. Close-up van de aansluitklemmen (bron: Martin Jepkens).

een smartphone. We zien hier de spanning van de individuele cellen samen met enkele systeemp parameters. Bij een lichte belasting van 75 W is de laagste celspanning 3,307 V (weergegeven in rood, bij cel #8) en de hoogste 3,311 V (weergegeven in blauw, bij cel #3); een verschil van slechts 4 mV!

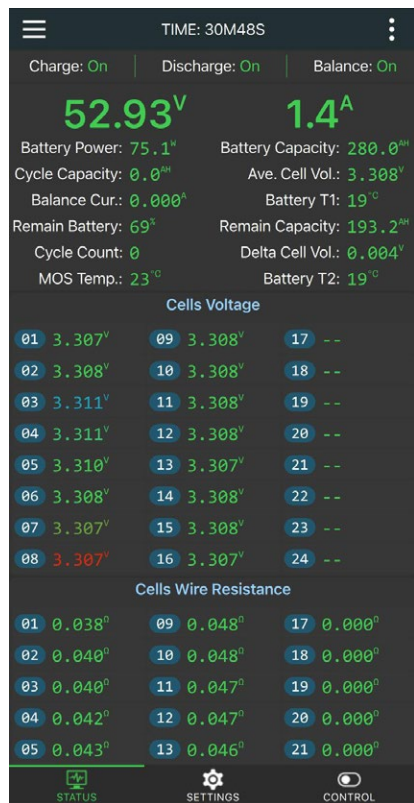
Is zelfbouw de moeite waard?

Het is nog steeds lonend om zelf een thuisaccu samen te stellen. Als u niet zo diep in de materie wilt duiken als Martin, kunt u ook kiezen voor een accu-kit. Helaas blijken die kits vaak duurder te zijn dan een volledig zelfgebouwde oplossing. Dus u zult het helemaal zelf moeten doen. Het is wel een heel leerzaam project. Wie zijn kennis over zonnepanelen wil oprispen, kan terecht bij een eerder artikel van mijn hand [6].

Wat is de beste accucapaciteit? Met een bescheiden zonnepaneel (zoals Martin's 3,4 kWp) in combinatie met een tamelijk grote accu van 14,3 kWh bereikt u een goede energie-autonomie. De mate van autonomie ligt niet alleen aan de accucapaciteit maar ook aan uw geografische locatie. Die relatie is niet lineair; als u dichtbij 90% autonomie komt, is een grotere accu in Centraal Europa (of de zuidelijke helft van Chili en Argentinië) economisch niet meer verantwoord. We hebben het dan al over accu's van zo'n 50 kWh. Die zijn niet alleen kostbaar, maar ook lastig te integreren, want veel standaard-omvormers zijn helemaal



Figuur 11. Testen van de capaciteit van alle cellen met behulp van een elektronische belasting (bron: Martin Jepkens).



niet geschikt voor zulke grote capaciteiten. Complete autonomie uit zonnepanelen, zonder aansluiting op het stroomnet, is voor een typisch huishouden eigenlijk niet meer dan een kostbare illusie. Om langere perioden zonder zonlicht te overbruggen, zult u toch aangewezen zijn op een diesel-aggregaat of iets dergelijks. ◀

vertaling: Evelien Snel — 220233-03

Vragen of opmerkingen?

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



Over de auteur

Dr. Thomas Scherer volbracht eerst een leertijd als telecommunicatie-elektronicus en werkte daarna bij de redactie van Elektor vanaf 1980. Na een studie psychologie en meerdere jaren fundamenteel onderzoek werkt hij nu als freelance-auteur en hij heeft in de loop der jaren veel artikelen voor Elektor geschreven. Hij heeft een groot elektronicalab en is zowel in neuronen als in elektronen geïnteresseerd; met andere woorden: eigenlijk alles wat met elektriciteit te maken heeft.

Figuur 12. Een app geeft de klemspanning van elke cel weer. De laagste waarde wordt weergegeven in rood en de hoogste in blauw (bron: Martin Jepkens).

FOCUS THEMA

Bezoek onze **Energie & vermogen** themapagina voor meer artikelen, projecten, nieuws en video's.

www.elektormagazine.nl/energie-vermogen



Gerelateerde producten

- > **PCW05A True RMS Clamp Meter (600 A)**
www.elektor.nl/20834
- > **Elektor-Special: Solaranlagen und Photovoltaik [German]**
www.elektor.de/20596



WEBLINKS

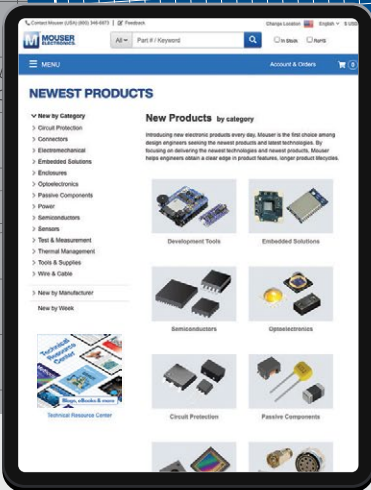
- [1] T. Scherer, "Zonnepanelen op je balkon", Elektor september/oktober 2021: <https://www.elektormagazine.nl/magazine/elektor-185/59907>
- [2] T. Scherer, "Optimalisatie van balkon PV-centrales", Elektor januari/februari 2024: <https://www.elektormagazine.nl/magazine/elektor-326/62602>
- [3] Donkerstroom: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dark_current_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Dark_current_(physics))
- [4] S. Enkhart, "Weitere Brände von Photovoltaik-Batteriespeichern", pv magazine, 2023 [Duits]: <https://tinyurl.com/22ztz8vb>
- [5] Verslag door Dr. David van Oheimb [Duits]: <https://ddvo.github.io/Solar/Speicher.html>
- [6] Zonnepanelen, Elektor Special: Solaranlagen und Photovoltaik, p. 26 [Duits]: <https://tinyurl.com/45z2y34w>
- [7] BYD Battery-Box: <https://www.bydbatterybox.com>
- [8] Eco-worthy: <https://de.eco-worthy.com>

Ontdek

Ontwerp

Ontwikkel

nl.mouser.com



Bestel - met - vertrouwen



MOUSER
ELECTRONICS

Simulator voor zonnepanelen

test en optimaliseer MPP-trackers en omvormers

Dipl.-ing. Peter Kroll (Zwitserland)

Tegenwoordig zien we overal zonne-installaties en er zijn er nog veel meer gepland – zowel grote zonneparken als kleine installaties, op de daken van privé-huizen. Daarnaast zijn er nog kleinere toepassingen met een vermogen van slechts een paar watt. Omvormers of laadregelaars met MPP-trackers worden vaak gebruikt om de energieopbrengst te optimaliseren. Optimalisatie van een systeem met echt licht is moeilijk vanwege de fluctuerende omstandigheden. Dit artikel beschrijft een eenvoudige en goedkope zonnepaneelsimulator die een 50W-zonnepaneel elektronisch nabootst.

Om ervoor te zorgen dat een simulator parameters zoals verschillende zonnestraling en andere omgevingsinvloeden kan nabootsen, zijn de kortsluitstroom I_{SC} , de onbelaste spanning V_{OC} en de temperatuurcoëfficiënt TC instelbaar gemaakt in deze zonnepaneel-simulator. Dat betekent dat u ook andere modules kunt simuleren dan de module die wordt beschreven in het kader **50W-paneel van Phaesun** en dat in dit artikel als voorbeeld wordt gesimuleerd.

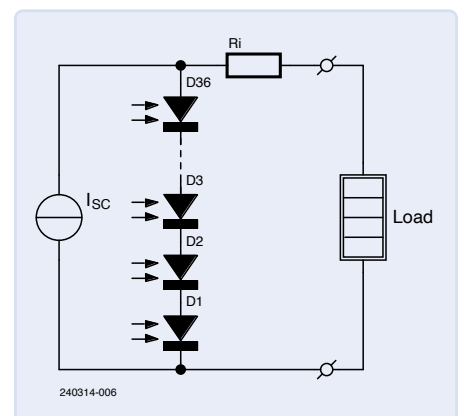
Simulatieschakeling

Zoals elk zonnepaneel heeft het 50 W Phaesun-paneel een temperatuurcoëfficiënt die niet verwaarloosd mag worden. Als bijvoorbeeld de moduletemperatuur door zonnestraling oploopt van 25 °C tot 60 °C, daalt de onbelaste spanning van 21,6 V naar 18,95 V. Als

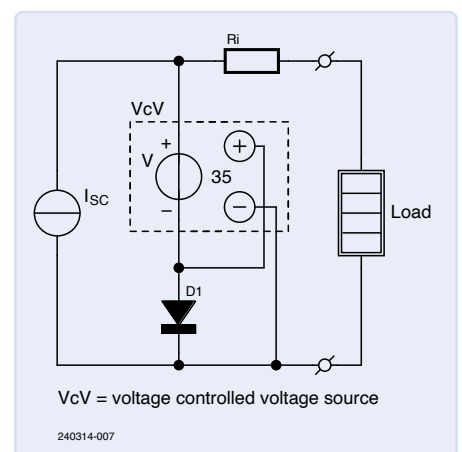
de temperatuur in de winter daalt van 25 °C naar -10 °C, stijgt de onbelaste spanning naar 24,25 V. De temperatuurafhankelijkheid wordt ook weerspiegeld in het haalbare vermogen, dat afneemt met toenemende temperatuur.

Figuur 1 toont de interne opbouw van het zonnepaneel. Het bestaat uit 36 afzonderlijke cellen die in serie zijn geschakeld. Als we zo'n paneel willen simuleren, heeft het weinig zin om het te vervangen door een serieschakeling van 36 even krachtige siliciumdiodes. Het zou eleganter zijn om de spanning van een diode te vermenigvuldigen met een factor 35, zoals in **figuur 2**, en het resultaat op te tellen bij D1. De vermenigvuldiging wordt gedaan door VcV – een spanningsbron die wordt aangestuurd door de spanning over D1.

Om dit principe in de praktijk toe te passen, moet het eerst vertaald worden naar een



Figuur 1. Vervangingschema van een zonnepaneel met 36 cellen.



Figuur 2. Vervangingschema: vermenigvuldiging van de spanning over D1 met 35.

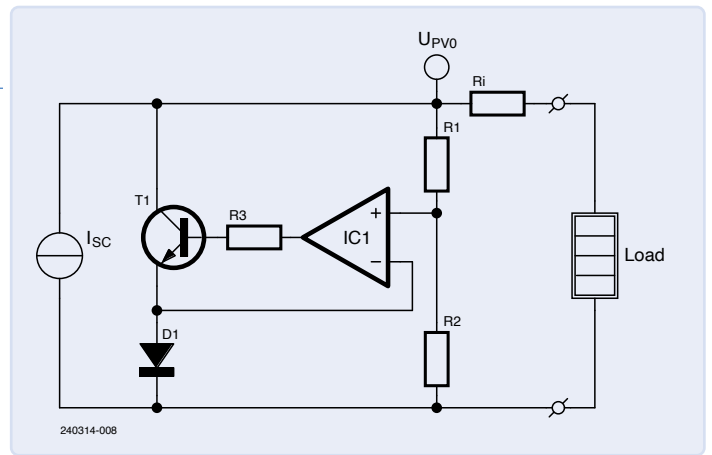
'echte' schakeling. Een eerste basisschakeling is te zien in **figuur 3**. De stroombron I_{SC} levert een bepaalde constante stroom. Deze stroom vloeit deels door de belastingweerstand en deels door de (gesimuleerde) diodepaden plus D1. In rust, zonder belasting, loopt de volledige stroom door het gesimuleerde paneel. Bij kortsluiting loopt alle stroom echter door de belasting met een weerstand van (ideali-ter) 0Ω . De spanningsvermenigvuldiger in figuur 3 wordt gevormd door de vermogens- transistor T1, opamp IC1 en de spanningsdeler bestaande uit R1 en R2. De waarde van R1 is 35 keer zo groot als die van R2. Een stroom- begrenzende weerstand R3 is opgenomen vóór de basis van T1.

Simulatieschakeling plus D1

De functie van de schakeling als geheel hangt grotendeels af van de eigenschappen van D1. Elke afwijking van zijn diodespanning ten opzichte van het te simuleren gedrag wordt met een factor 36 vergroot door een opamp in de schakeling van figuur 3. Vooral de temperatuurcoëfficiënt van de doorlaatspanning van D1 is hier van belang. Om de invloed hiervan te minimaliseren is D1 gemonteerd op zijn eigen koellichaam, los van de eindtransistoren, en wordt hij gekoeld door lucht op omgevingstemperatuur. Idealiter wordt voor D1 een voldoende 'veerkrachtige' diode gekozen met de laagst mogelijke warmteweerstand van junctie naar behuizing. Het koellichaam moet voldoende groot zijn en een lage warmteweerstand hebben. Hoe beter de koeling, hoe onafhankelijker de zonnepaneelsimulator is van de temperatuur van D1. In de specifieke schakeling van de zonnepaneel-simulator (**figuur 4**) wordt de substraatdiode van een IRFP450-MOSFET gebruikt voor D1; de gate van deze transistor is kortgesloten naar de source. Deze diode heeft een lage $R_{th(j-c)}$ van slechts $0,66 \text{ K/W}$. Let op: de schakeling in figuur 4 wordt hieronder beschreven in de paragraaf **Oorspronkelijke schakeling**. Zelfs als hij werkt, vormt hij nog niet de definitieve oplossing, waarin de relevante parameters kunnen worden aangepast. Hierover later meer.

Om bijna de gehele karakteristiek van het gesimuleerde zonnepaneel te kunnen doorlopen, is het mogelijk om R_{Load} continu te verhogen van 0Ω tot 500Ω . R21 vertegenwoordigt de inwendige weerstand R_i van het zonnepaneel. Deze waarde is bepaald door metingen en hangt ook af van de gebruikte diode (de substraatdiode van T3). Het maximale

Figuur 3. Basisschakeling van de simulator voor zonnepanelen.



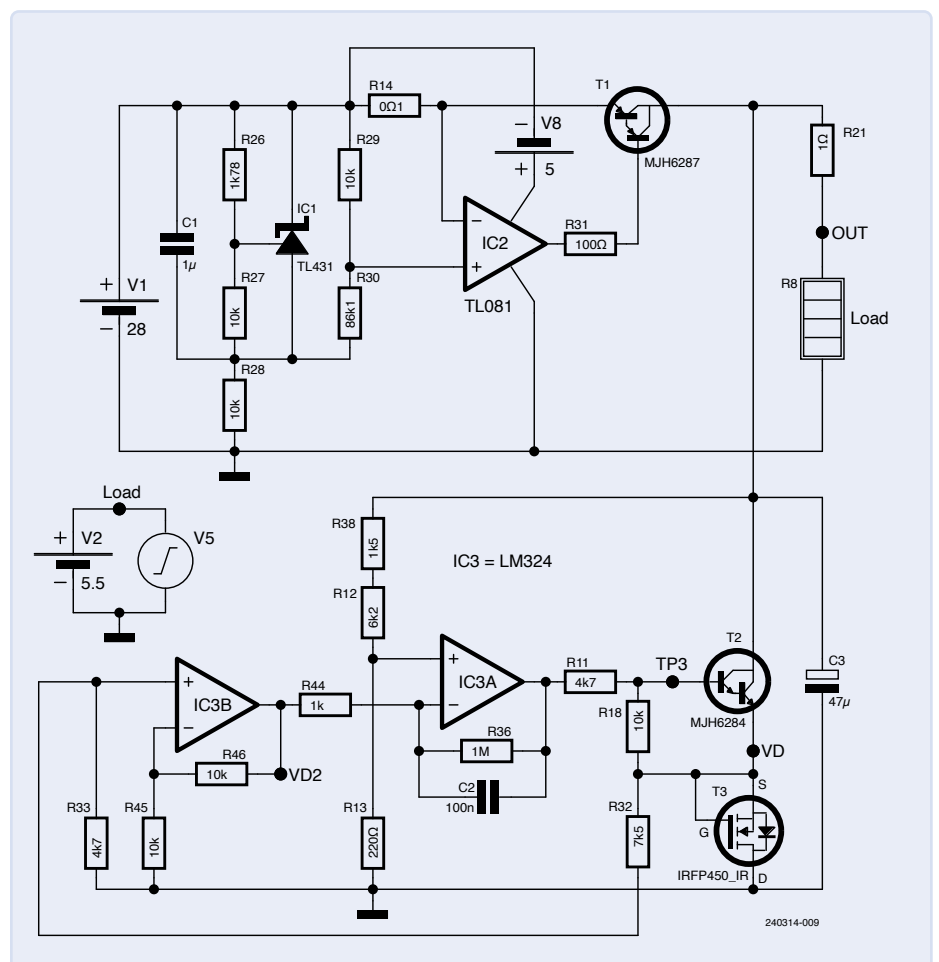
vermogenspunt (MPP) verschuift naar lagere MPP-spanningen bij een hogere inwendige weerstand.

V2 wordt in de DC-simulatie gebruikt als een referentievariabele voor de belastingweerstand R8. Dienovereenkomstig wordt V5 in de transient-simulatie gebruikt als een referentievariabele voor de belastingweerstand: Hier veroorzaakt een MPP-tracker een sprong in de belastingweerstand R8 van bijvoorbeeld 6 naar $6,5 \Omega$ en terug naar 6Ω . Om het optimale werkpunt te bepalen, werkt een MPP-tracker met belastingstappen. Hij springt heen en

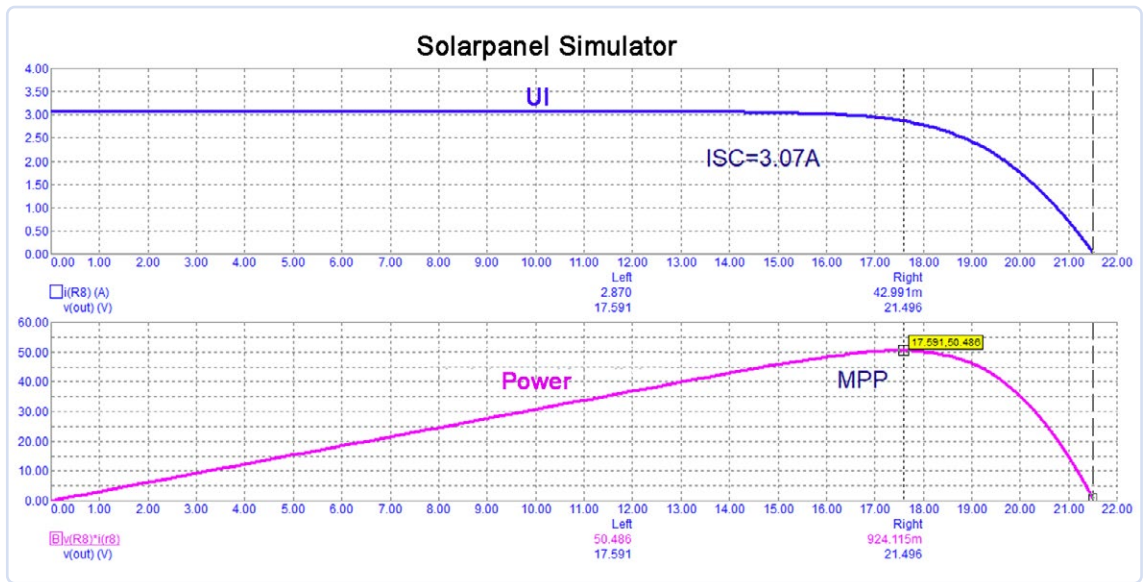
weer op de U/I -karakteristiek, op zoek naar het punt met het hoogste vermogen. Normaal gesproken is de stapgrootte klein zodat het MPP nauwkeurig genoeg wordt bereikt. V2 (DC) en V5 (transiënten) kunnen desgewenst als alternatief worden geactiveerd.

Simulatie

Als een DC-simulatie wordt uitgevoerd met de schakeling in figuur 4 en een diodetempera- tuur $T_3 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, worden de juiste waarden verkregen: $I_{SC} = 3,07 \text{ A}$, $V_{OC} = 21,5 \text{ V}$, $V_{MPP} = 17,6 \text{ V}$ en $P_{MPP} = 50,5 \text{ W}$. De resulterende



Figuur 4. Simulatieschakeling.



Figuur 5. DC-simulatie bij T_{D1} (X29) = 25 °C.

U/I-karakteristiek in **figuur 5** ziet er plausibel uit en komt overeen met wat men zou verwachten van een echt zonnepaneel. Het dynamische gedrag van een MPP-tracker als reactie op een stapsgewijze verandering in de belasting is ook interessant. De vraag is hoe snel en hoe goed het nieuwe setpoint wordt bereikt. Het regelgedrag van de simulator en de stabiliteit van het regelsysteem zijn ook relevant.

In de transient-simulatie van **figuur 6** wordt de al genoemde belastingsstap van 6,0 Ω naar 6,5 Ω en terug naar 6,0 Ω bij een frequentie van 50 Hz en $I_{SC} = 3,07$ A weergegeven in de directe omgeving van het MPP. De spanning springt van 17,398 V naar 18,037 V en terug naar 17,398 V zoals gewenst. Het vermogen springt van 50,447 W naar 50,052 W en weer terug naar 50,447 W. De reactietijd van de regeling was ongeveer 3 ms; een kleine overshoot is zichtbaar in het diagram. Het regelgedrag is dus snel genoeg, omdat een echte MPP-tracker meestal werkt met

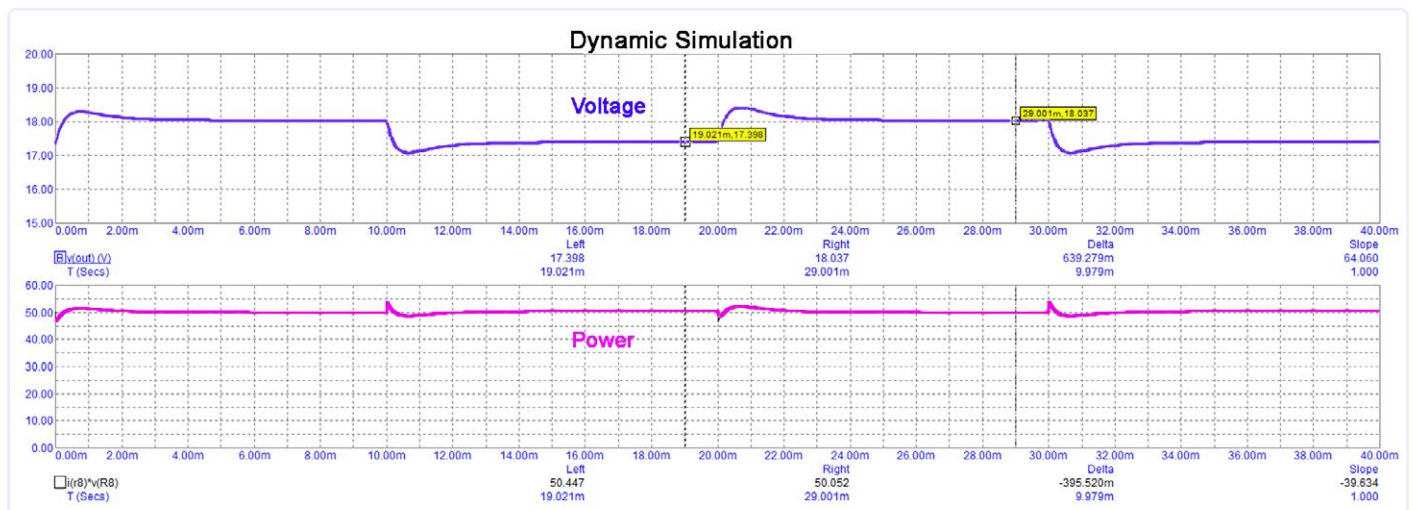
een veranderingssnelheid van 1..10 tests per seconde. Uit de twee simulaties blijkt dat met de gegeven dimensionering de karakteristiek van het 50 W zonnepaneel voldoende nauwkeurig kan worden gesimuleerd, zowel statisch als dynamisch. Voor veel toepassingen zou dit voldoende moeten zijn.

Oorspronkelijke schakeling

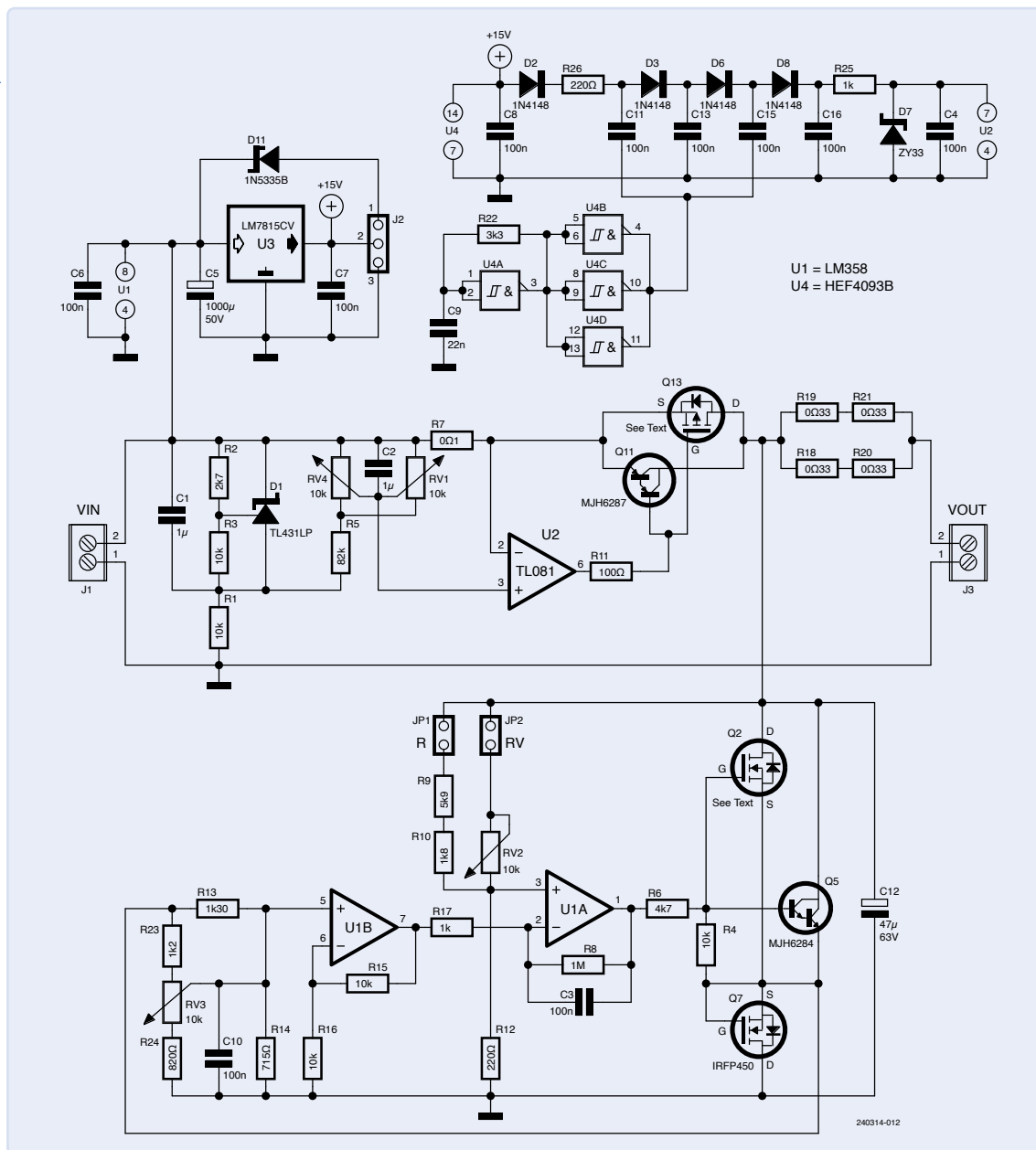
De I_{SC} -stroombron in **figuur 3** is in **figuur 4** gerealiseerd door de schakeling rond opamp IC2, de darlington PNP-transistor T1, senseweerstand R14 en de instelbare referentiespanningsbron rond IC1, die werkt met de TL431-parallellregelaar. In de uiteindelijke schakeling, die later wordt gepresenteerd, zijn R29 en R30 vervangen door een potentiometer, waardoor de kortsluitstroom I_{SC} continu kan worden aangepast. De spanningsbron V8 voorziet IC2 van een iets hogere voedingspanning dan de 28 V van de bedrijfsspanning V1, zodat de opamp altijd betrouwbaar werkt, zelfs als de referentiespanning laag wordt,

waardoor de spanning aan de twee ingangen van de opamp de 28 V nadert. In de uiteindelijke schakeling wordt deze hulpspanning gegenereerd door een spanningsvermenigvuldiger. T1 moet van het darlington-type zijn, omdat de basisstroom van een conventionele vermogenstransistor te hoog zou zijn voor de opamp en zijn voeding, en de collectorstroom te veel zou afwijken van de emitterstroom, wat dan zou leiden tot afwijkingen via R14 en een onnauwkeurige regeling door de opamp. De spanningsvermenigvuldiger van het referentie-diodetraject van **figuur 3** wordt in **figuur 4** gerealiseerd door de schakeling rond de opamp IC3A, de NPN-darlington T2, R12 + R38, R13, R18 en R11. De diodespanning V_D wordt afgetakt door de schakeling rond opamp IC3B en als VD2 toegevoerd aan de regelschakeling rond IC3A. Zoals reeds vermeld is de substraatdiode van T3 de referentie.

De vermenigvuldiging wordt verkregen uit de verhouding van R12 + R38 tot R13 en is, met



Figuur 6. Dynamische simulatie van een belastingsstap bij T_{D1} (X29) = 25 °C.



Figuur 7. De uiteindelijke schakeling van de zonnepaneel-simulator.

de gegeven waarden, precies 35. Deze kan ook regelbaar worden gemaakt door andere weerstanden schakelbaar te maken of door een potentiometer toe te voegen. Helaas traden er, in tegenstelling tot de simulatie, oscillaties op in de echte schakeling. Bij bepaalde werkpunten werken de constante stroombron en de spanningsvermenigvuldiging elkaar tegen, wat leidde tot oscillaties in het 200kHz-bereik. De spanningsversterking van IC3A is gereduceerd door een geschikte dimensionering van R36 en R44 en C2. Deze is nog steeds groot genoeg voor voldoende regelnaauwkeurigheid. Oscillaties en instabiliteiten worden ook verder geëlimineerd door de elektrolytische condensator C3. De instelbare temperatuurcoëfficiënt wordt gerealiseerd met de schakeling van IC3B. Als de weerstandsverhouding van R32 tot R33 instelbaar wordt gemaakt met een potentiometer, zoals in de uiteindelijke schakeling,

wordt de spanning van de diode van T3 veranderd (en vervolgens als VD2 naar de vermenigvuldiger gevoerd). De volledige schakeling rechts rond IC3A en IC3B werkt als een soort instelbare parallelle regelaar (parallel aan de belasting R_{Load}).

Uiteindelijke schakeling

Vergeleken met de oorspronkelijke schakeling in figuur 4 is de uiteindelijke schakeling in **figuur 7** niet noemenswaardig veranderd. De potentiometers zijn toegevoegd en er worden andere vermogenshalfgeleiders gebruikt. Omdat deze schakeling is gemaakt met KiCad, zijn de componentaanduidingen veranderd. Zoals altijd zijn de KiCad-bestanden, inclusief de print-layout, gratis beschikbaar op de Elektor-webpagina bij dit artikel [1]. De centrale componenten zijn, zoals voorheen, de regelbare stroombron en de regelbare spanningsvermenigvuldiger.

Stroombron

De referentiespanning voor de stroombron wordt gerealiseerd door de schakeling rond de parallelregelaar D1 en heeft een waarde van 3,17 V. Een deel van deze spanning, instelbaar via RV1 of RV4, gaat naar de niet-inverterende ingang van U2. De nominale waarde van deze spanning ten opzichte van de inverterende ingang is 0,34 V. Het evenwicht is bereikt als de spanningsval over R7 ook 0,34 V bedraagt, wat het geval is bij 3,4 A. Als lagere spanningen worden ingesteld, is de stroom navenant lager. Voor lagere vermogens kan Q13 in de kleinere TO220-behuizing worden gebruikt in plaats van Q11 in de TO218-behuizing. Alleen RV1 of RV4 wordt gemonteerd, dat wil zeggen slechts één potentiometer aan de boven- of onderrand van de print, – geheel naar smaak. C2 blokkeert eventuele storing en zorgt voor stabiliteit. De keuze van een TL081 voor U2 zorgt voor



Onderdelenlijst

Weerstanden:

(tenzij anders aangegeven: axiaal, metaalfilm, 1%, 0,25 W)

R1...R4 = 10 k

R2 = 2k7

R5 = 82 k

R6 = 4k7

R7 = draadgewonden weerstand 0,1 Ω, 5 %, 3 W

R8 = 1 M

R9 = 5k9

R10 = 1k8

R11 = 100 Ω

R12 = 220 Ω

R17,R23 = 1 k

R13 = 1k3

R14 = 715 Ω

R15,R16 = 10 k

R18...R21 = draadgewonden weerstand, axiaal, 0,33 Ω, 5%, 3 W

R22 = 3k3

R23 = 1k2

R24 = 820 Ω

R25 = 1 k

R26 = 220 Ω

RV1...RV4 = potentiometer 10 k, 20%, horizontaal, lineair

Condensatoren:

C1,C2 = 1 μ/100 V, 10%, MKS2, steek 5 mm

C3,C4,C6...C8,C10,C11,C13,C15,C16 = 100 n/63 V, 10%, MKS2, steek 5 mm

C5 = 1000 μ elco, 50 V, low ESR, verticaal

C9 = 22 n/ 250 V, 10 %, MKS2, steek 5 mm

C12 = 47 μ elco, 63 V, verticaal

Halfgeleiders:

D1 = TL431ACLP, TO92

D2,D3,D6,D8 = 1N4148, DO-35

D11 = zenerdiode, 3,9 V/5 W, DO201

Q2 = N-kanaals MOSFET als alternatief *

Q5 = MJH6284G, TO247 *

Q7 = IRFP450, TO247 *

Q11 = MJH6287G, TO247 *

Q13 = P-kanaal MOSFET als alternatief *

U1 = LM358, DIP8

U2 = TL081, DIP8

U3 = 7815, TO220

U4 = 4093, quad NAND Schmitt-trigger

Diversen:

HS1 = koellichaam LAM 4, ingekort tot 30 mm *

HS2 = koellichaam LAM 4, ingekort tot 100 mm *

HS4 = koellichaam voor TO220, verticaal, 18 K/W

J1,J3 = 2-polige printkroonsteen, steek 2/10", schuin *

J2 = 3-polige busstrip, steek 1/10"

JP1,JP2 = 2-polige pinheader, steek 1/10", verticaal

jumper, steek 1/10", voor JP1 of JP2

print 240314-01

* zie tekst

hoogohmige ingangen die weinig stroom trekken, zodat de voeding van de spanningsverdrivoudiger rond U4 slechts licht belast wordt. U4A is aangesloten als oscillator en levert een blok golf in een tweecijferig kHz-bereik. De parallelschakeling van de overige drie poorten als een soort eindtrap maakt een grotere uitgangsstroom mogelijk. De vermenigvuldigingscascade zelf is opgebouwd uit C11, C13, C15, C16, D2, D3, D6, D8 en de stroombegrenzer R26. R25 wordt samen met C4 gebruikt voor afvlakking en D7 voor spanningsbegrenzing. De verdrivoudiger wordt van 15 V voorzien door U3. J2 zorgt voor massa en de +15 V van U3. Daarnaast is er een 24V-voeding voor de ventilator voor het koellichaam, die via D11 wordt afgeleid van de 28 V van VIN.

Diode-spanningsvermenigvuldiger

Het basisprincipe van de werking van de spanningsvermenigvuldiger is al beschreven. Als JP1 (R) is geplaatst, werkt de schakeling met de vermenigvuldigingsfactor die wordt bepaald door R9 + R10. Als JP2 (VR) daarentegen is geplaatst, is de vermenigvuldigingsfactor afhankelijk van RV2 en dus traploos instelbaar. De temperatuurcoëfficiënt wordt ingesteld met de potentiometer RV3. Een zinvol instelbereik wordt bepaald door R13 parallel te schakelen en R23 en R24 in serie. Bij een temperatuur van 25 °C resulteert een middenstand van RV3 in een spanning van 0,6 V op Q7 aan de uitgang van opamp U1B. Als het instelbereik niet juist is, kan R23 of R24 worden aangepast.

Vermogensweerstand

Toen ik deze schakeling voor het eerst uitprobeerde, had ik de weerstanden R18...R21 direct op de print gemonteerd om een acceptabele MPP-spanning in te stellen. In het begin gebruikte ik een P600G als referentiediode. Het nadeel van deze keuze was dat deze diode niet goed genoeg gekoeld kon worden, waardoor de temperatuurdrift van de onbelaste spanning door zelfverhitting te groot was. Daarom ben ik uiteindelijk overgestapt op de substraatdiode van de MOSFET IRFP450 (Q7) in TO247-behuizing en heb ik de weerstanden R18...R21 vervangen door een draadbrug. Deze MOSFET heeft een trage interne diode met een lagere doorlaatspanning. MOSFET's met snelle diodes zijn minder geschikt.

Instellingen

Kortsluitstroom ISC

Hiervoor wordt een voedingsspanning van

28 V met een belastbaarheid van minstens 3,5 A aangesloten op J1. Het instellen van I_{SC} is relatief eenvoudig: sluit gewoon een ampèremeter van 10 A aan op de klemmen van uitgang J3. Het meetresultaat komt overeen met de kortsluitstroom die kan worden ingesteld met RV1 of RV4. I_{SC} van een echt zonnepaneel is ietwat temperatuurafhankelijk!

Onbelaste spanning VOC

Ook hier wordt eerst de voedingsspanning van 28 V op de VIN-ingang gezet. Een voltmeter in het 50V-bereik wordt nu aangesloten op de uitgang – bij viercijferige multimeters is dit meestal het meetbereik tot 199,9 V. Afhankelijk van de geplaatste jumper is er een vaste VOC (JP1) of kan deze worden aangepast met RV2 (JP2).

Voor de juiste instelling wordt RV3 eerst in de middenpositie gezet. De vaste vermenigvuldigingsfactor wordt berekend als $(R9 + R10) / R12$. Met de gegeven waarden resulteert dit in een factor 35. Aangezien de spanning van U1B hierbij wordt opgeteld, komt een uitgangsspanning van $36 \times 0,6$ V op J3 overeen met 0,6 V ingesteld op RV3 aan pin 7 van U1B, wat overeenkomt met V_{OC} .

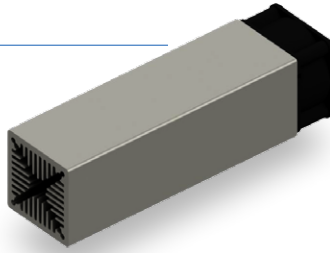
Temperatuurcoëfficiënt TC

Opnieuw wordt de voedingsspanning van 28 V aangesloten op de ingang. De temperatuurafhankelijkheid van de onbelaste spanning V_{OC} wordt op de gewenste waarde ingesteld met RV3.

Alternatieve MOSFET's

In plaats van de darlington's biedt het gebruik van geschikte MOSFET's een verbetering van het temperatuurgedrag. De thermische weerstand $R_{th(j-c)}$ van sommige MOSFET's is slechts half zo hoog als die van de gespecificeerde darlington's. Voor Q13 in plaats van Q11 kunnen bijvoorbeeld de types IXTH80N075L2 of IXTH64N10L2 (bij voorkeur in een TO247-behuizing) worden overwogen. Voor Q2 in plaats van Q5 zijn bijvoorbeeld de types IXTH26P20P (TO247) of IXTQ26P20P (TO-3P) geschikt. Bij deze types is het silicium thermisch beter gekoppeld aan de behuizing en dus uiteindelijk ook beter gekoppeld aan het koellichaam. Overigens zijn de alternatieven Q2 en Q13 daarom in het schakelschema getekend, omdat hun aansluitpinnen (vanwege een andere pinning) extra aanwezig zijn op de print.

Met MOSFET's doet zich het probleem van



Figuur 8. LAM 4 150 24 koellichaam van Fischer Elektronik (bron [2]).

de vermogensdissipatie en second breakdown niet voor. Bovendien is de transconductantie van MOSFET's aanzienlijk lager dan die van bipolaire junctietransistoren, zodat oscillaties niet zo gemakkelijk optreden en het misschien zelfs mogelijk is om zonder C12 te werken. Dit zou in de praktijk getest moeten worden.

Mechanisch

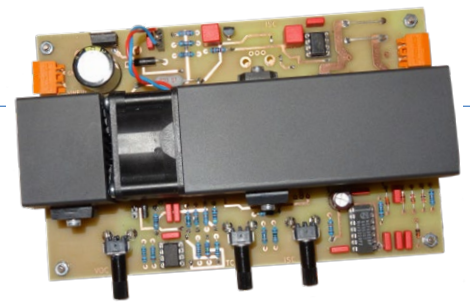
Aansluitingen

Er zijn WAGO-aansluitingen op de printplaat. Bij het aansluiten en loskoppelen kunnen de optredende krachten onder bepaalde omstandigheden de printsporen beschadigen. Om dit te vermijden, zijn de terminals vastgelijmd aan het printmateriaal zodat de krachten door het materiaal zelf worden geabsorbeerd.

Koellichaam

Een speciaal aluminium koellichaam van Fischer [2] wordt gebruikt om de warmte af te voeren. Het bestaat uit een vierkante buis met een rand van 4 cm en vinnen aan de binnenzijde, evenals een ventilator met een thermische weerstand van iets meer dan 0,6 K/W (zie **figuur 8**). Er zijn twee koellichamen gebruikt met een lengte van 30 resp. 100 mm. Het originele koellichaam van 150 mm lang wordt in twee delen gezaagd (30 en 100 mm). De ventilator wordt tussen de twee delen geplaatst, zodat de inlaatzijde zich aan de linkerkant van het 30mm-deel bevindt. Q7 wordt aan deze koude kant gemonteerd. Q5/Q11 of als alternatief Q2/Q13 zijn bevestigd aan de langere 100mm-buis, omdat hier veel warmte moet worden afgevoerd. Bij een voedingsspanning van 28 V en een kortsluitstroom van 3,07 A zou in het ergste geval 86 W moeten worden gedissipeerd. Gelukkig komt dit zelden voor en als het gebeurt, is het maar voor korte tijd. Een MPPT-laadregelaar die is aangesloten op de simulator zal slechts een fractie van dit maximale vermogen veroorzaken als hij goed functioneert.

Het is beter om de ventilator te verwijderen voordat u gaat zagen. Na het zagen en tappen moeten eventuele bramen worden verwijderd met een platte sleutelvijl. Het koellichaam



Figuur 9. De volledig opgebouwde print van het prototype inclusief koellichaam.

komt dan, samen met de ventilator als geheel via een elektrisch isolerende, maar warmtegeleidende folie (100x40 mm), aan de rechter (warme) kant direct op de print. Zo wordt wat extra warmte afgevoerd via de print.

De ventilator zelf krijgt zijn 24 V van de 28 V via de spanningsreductie door D11. Vanwege de diameter en de relatief hoge snelheid die ermee gepaard gaat, is hij goed hoorbaar.

Bouw

De constructie inclusief de geassembleerde print is te zien in **figuur 9** en maakt duidelijk wat er bedoeld wordt. Voor mijn prototype heb ik het aluminium koellichaam zwart gemaakt zodat er iets meer warmte kan worden afgevoerd via infraroodstraling. Dit is niet echt nodig voor het koellichaam voor Q7, maar omdat ik toch al bezig was...

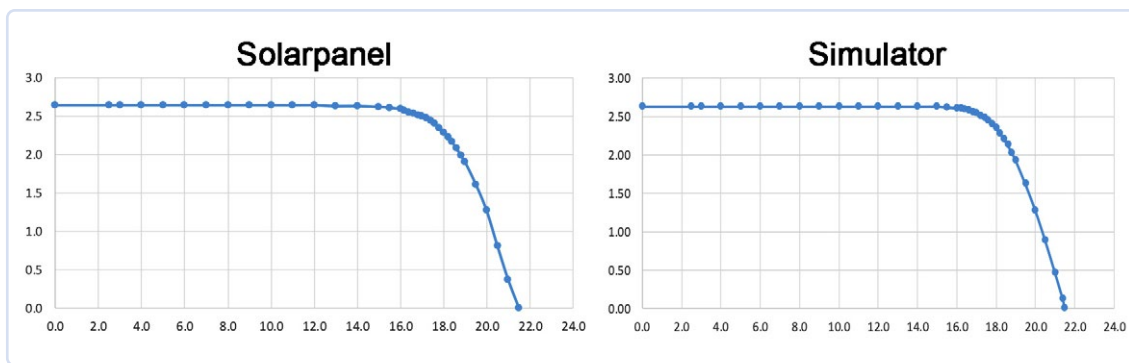
De transistoren moeten eerst (geïsoleerd) op het koellichaam worden gemonteerd en vervolgens op de print worden gesoldeerd. Kleine toleranties worden gecompenseerd door sleufvormige gaten in de printplaat. Vermijd bij het monteren lucht tussen de transistorbehuizing en het koellichaam. Het gebruik van warmtegeleidende pasta is geen slecht idee.

De volledige elektronica, inclusief koellichaam, past op een tweezijdige Europrint van 160 x 100 mm en door de schroefverbinding met het koellichaam ontstaat een vrij compacte module.

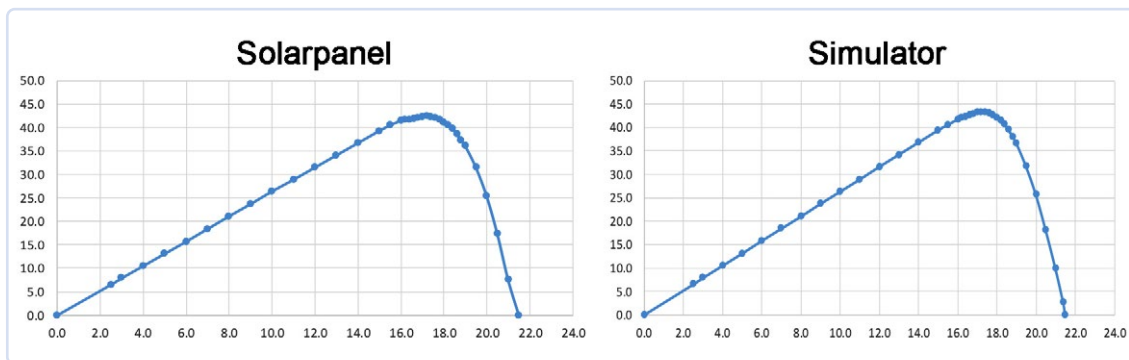
Metingen

Om te beoordelen hoe dicht de zonnepaneel-simulator een echt paneel benadert, heb ik typische waarden en karakteristieken van het Sun Plus 50 S-zonnepaneel van Phaesun en mijn simulatorschakeling gemeten. Vanwege het gebrek aan regelbare en zeer dure laboratoriumverlichting heb ik de metingen aan het echte zonnepaneel buiten uitgevoerd. Het paneel stond op het zuiden gericht, er was geen wind en de lucht was helder. Om 13:15 uur – kort na het echte midden van de dag tijdens de zomertijd – werd het paneel zo gericht dat de zonnestralen verticaal op het paneel vielen.

Figuur 10. U/I-karakteristieken van het echte zonnepaneel (links) en de simulator (rechts); stroom [A] vs. spanning [V].



Figuur 11. Vermogen als functie van de spanning bij het echte zonnepaneel (links) en de simulator (rechts); vermogen [W] vs. spanning [V].




Figuur 10 toont de U/I-karakteristieken. De simulator is ingesteld op $V_{OC} = 21,5$ V en $I_{SC} = 2,64$ A. Zoals u ziet, zijn de karakteristieken vrijwel identiek. Er is ook vrijwel geen verschil in de vermogenskarakteristieken in **figuur 11**. Wat betreft de statische waarden kan dus veilig worden aangenomen dat de simulator het echte paneel heel dicht benadert. Om een indruk te krijgen van het regelgedrag van de zonnepaneelsimulator, heb ik deze aangesloten op een programmeerbare elektronische belasting. In principe is dit een

vermogens-zenerdiode met instelbare zener-spanning. Met deze belasting werden periodieke sprongen van 17 naar 16,5 V en terug met een duur van telkens 13 ms ingesteld. De oscillogrammen van **figuur 12** tonen de stapresponsie aan de uitgang van de simulator. Links is de verticale resolutie 5 V/div, terwijl rechts een hogere resolutie van 200 mV/div is ingesteld. De horizontale resolutie is 5 ms/div voor beide oscillogrammen. De stapresponsies zijn zeker niet ideaal, maar voldoen prima voor onze doeleinden.

Vermogensbereik tot 50 W

De hier gepresenteerde simulator voor zonnepanelen is geschikt voor het simuleren van de meeste panelen in het vermogensbereik tot 50 W bij een 'systeemspanning' van 12 V, zoals gebruikt worden voor het laden van bijvoorbeeld 12V-accu's. De vrijwel identieke eigenschappen van het zonnepaneel en de simulator duiden op een goed simulatieresultaat. Met behulp van deze simulator is het mogelijk om het gedrag van aangesloten laadregelaars of omvormers met MPP-trackers op een reproduceerbare manier te controleren, ongeacht het weer.

Het is niet aan te raden om omvormers te testen die zijn aangesloten op het elektriciteitsnet, omdat het niet zeker is dat deze omvormers elektrisch voldoende geïsoleerd zijn. Maar zelfs in balkoncentrales worden geen kleine panelen met 36 cellen gebruikt, dus het is onwaarschijnlijk dat u dit probleem tegenkomt.

Aanzienlijk hogere MPP-vermogens bij hogere systeemspanningen dan gebruikelijk in een bereik van meer dan 50 W zouden veeleer gerealiseerd moeten worden met een andere schakelingsopzet. 

240314-03

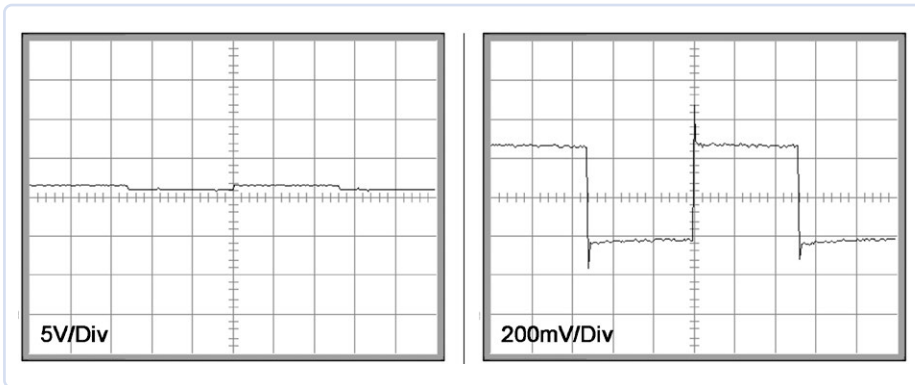
Vragen of opmerkingen?

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

50W-paneel van Phaesun

Typische waarden bij een celtemperatuur T_j van 25 °C en een bestralingssterkte van 1000 W/m².

Fabrikant	Phaesun
Type	Sun Plus 50 S
Temperatuurbereik	-40 to 85°C
Systeemspanning	12 V
P_{MPP}	50 W (max. via MPPT)
V_{MPP}	17,6 V (optimal MPPT voltage)
I_{MPP}	2,84 A (optimal MPPT current)
I_{SC}	3,07 A (short-circuit current)
V_{OC}	21,6 V (open-circuit voltage)
Aantal cellen	36
Module efficiëntie	15,2%
TC^{Power}	-0,45%/K
TC_{VOC}	-0,37%/K
TC_{ISC}	-0,081%/K



Figuur 12. De stapresponsie van de simulator is niet ideaal, maar zeker goed genoeg.

FOCUS THEMA

Bezoek onze **Energie & vermogen** themapagina voor meer artikelen, projecten, nieuws en video's.

www.elektormagazine.nl/energie-vermogen



Gerelateerde producten

- > **OWON SPE6103 DC Power Supply (300 W)**
www.elektor.nl/20502
- > **Siglent SDL1020X-E Programmable DC Electronic Load (200 W)**
www.elektor.nl/19254

Over de auteur

Peter Kroll heeft als ontwikkelingsingenieur gewerkt op het gebied van voedingen voor telecommunicatietoepassingen, automatiseringstechnologie, medische technologie en fotovoltaïsche energie. Hier heeft hij zich gespecialiseerd in omvormers voor zonne-energiesystemen van 15 W tot 15 kW en gatedrivers voor IGBT/SiC-modules.

WEBLINKS

- [1] Elektor-webpagina bij dit artikel: <https://www.elektormagazine.nl/240314-03>
 [2] Koellichaam Fischer LAM 4 150 24: <https://tinyurl.com/Fischer-LAM>

Zij vertrouwen ons, u ook?

elektor.nl

Alles conform bestelling snel geleverd
Alles conform bestelling snel geleverd. Prima bedrijf.
Date of experience: July 18, 2024

Goede service
Wagen over het product werden goed en snel beantwoord. Snelle levering. Vanwege defect aan opbergdoos werd er op verzoek een nieuwe opbergdoos opgestuurd.
Date of experience: October 26, 2023

Correcte en vlugge levering
Correcte en vlugge levering. Boek "Practical Electronics crash course" is een leuk doek als opfrissing en ook voor studenten.
Date of experience: June 21, 2024

Snelle levering
Snelle levering. Verzorgde en goede verpakking.
Date of experience: June 14, 2024

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'

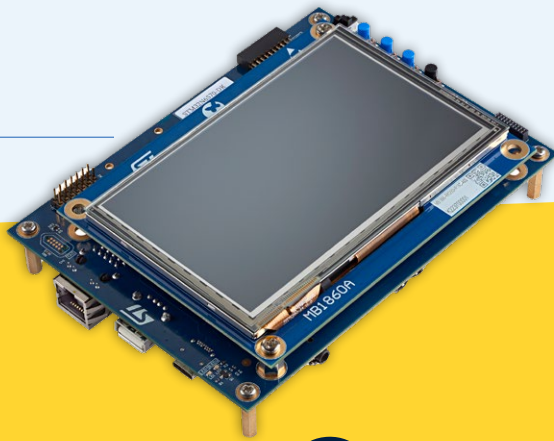
Elektor Store
Reviews 365 • Excellent
★★★★★ 4.3
VERIFIED COMPANY

Bekijk meer beoordelingen op onze Trustpilot-pagina: www.elektor.com/TP/nl



Of oordeel zelf door een bezoek te brengen aan onze Elektor Store, www.elektor.nl





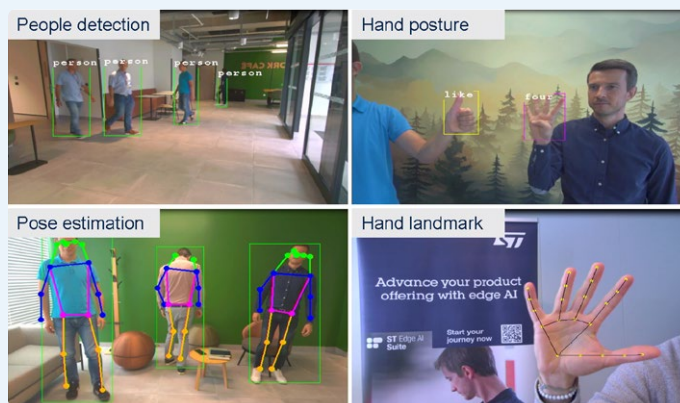
STM32 Edge-AI-Contest

Ontdek de nieuwe STM32N6 en ding mee naar in totaal € 5000!

Het Elektor Content Team

Edge-AI is belangrijk voor toepassingen die een lage latentie, realtime besluitvorming, verbeterde privacy en lagere kosten voor dataoverdracht vereisen. Met zijn AI-accelerator en rijke set aan periferie is de nieuwe STM32N6570 microcontroller van STMicroelectronics op maat gemaakt voor Edge-AI-toepassingen zoals beeldherkenning en spraakverwerking. De STM32N6570-DK AI Development Kit, uitgerust met een 5" capacitief multitouch display, microSD kaartslot en vele andere functies, vergemakkelijkt de ontwikkeling van prototypes. Het beste: Creatieve ontwikkelaars hebben nu de kans om een van deze boards gratis te krijgen. Meld u aan voor deelname aan de STM32 Edge-AI Contest – in totaal ligt er € 5000 aan prijzen voor het grijpen!

Kunstmatige intelligentie (AI) verandert ons dagelijks leven en industriële productie, verkeer en logistiek. In de gezondheidszorg zorgt AI voor draagbare apparaten en diagnostische hulpmiddelen, terwijl het in de industriële automatisering robotica en voorspellend onderhoud aanstuurt, waardoor de efficiëntie beter wordt en de uitvaltijd afneemt. Slimme huizen profiteren van AI via spraak gestuurde assistenten en verbeterde beveiliging, terwijl autonome robotsystemen AI gebruiken voor navigatie, objectmanipulatie en precisietaken. Consumentenelektronica, zoals gameapparaten en camera's, gebruiken AI voor meeslepende en gebruiksvriendelijke ervaringen, waardoor AI een hoeksteen van moderne innovatie wordt.



Figuur 1. De Neural-ART Accelerator in actie, demonstreert krachtige AI-inferentiecapaciteiten voor Edge-toepassingen.

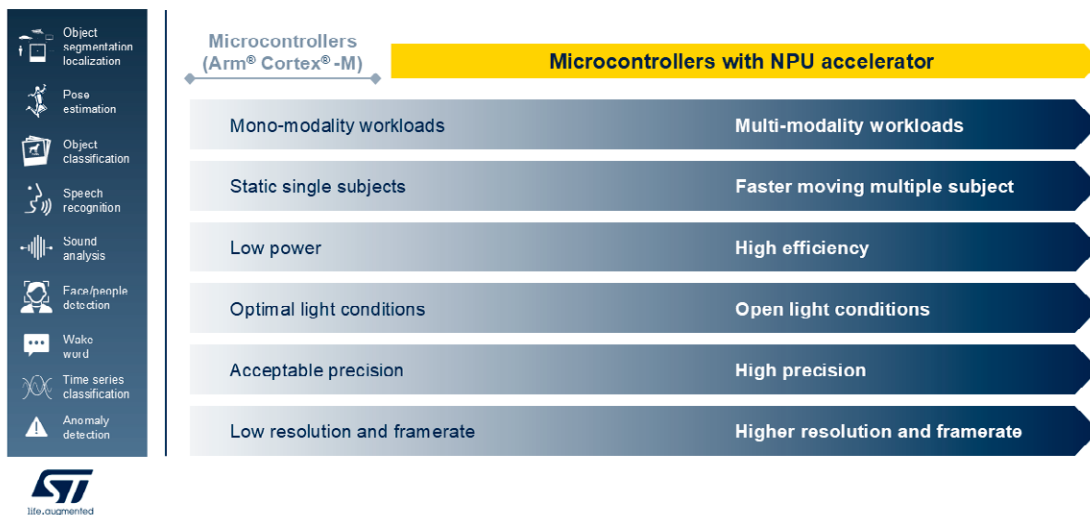
Wat is Edge-AI?

Edge-AI houdt in dat data lokaal worden verwerkt op embedded devices, met een lage latentie, verbeterde privacy en minder afhankelijkheid van cloudsysteem. Dit is met name cruciaal voor realtime-toepassingen zoals mobiele robotica of bewaking op afstand, waar de connectiviteit beperkt kan zijn. Doordat data niet meer naar de cloud hoeven te worden gestuurd, verbetert Edge-AI de responstijden, wordt gevoelige informatie beveiligd en worden de operationele kosten verlaagd. Er is echter zowel software- als hardware optimalisatie nodig om rekenintensieve taken uit te voeren binnen de beperkingen van stroom en resources.

Met de STM32N6570-Edge-AI mogelijk maken

De nieuwe STM32N6 microcontroller van STMicroelectronics is de krachtigste STM32 ooit, en de eerste met een geïntegreerde Neural Processing Unit (NPU) – op maat gemaakt om de uitdagingen van Edge-AI aan te gaan door middel van efficiënte, realtime verwerking van data. De STM32N6570 is een van verschillende STM32N6-varianten. De Neural-ART Accelerator levert 600 GOPS aan AI-inferentievermogen, waardoor taken als object- en gebarenherkenning in videoframes (figuur 1), spraakverwerking en afwijkingdetectie mogelijk worden. Aangedreven door een Arm Cortex-M55 kern die werkt op maximaal 800 MHz, levert de STM32N6570 hoge prestaties met 1280 DMIPS en 3360 CoreMark, waardoor hij geschikt is voor veeleisende AI-workloads.

From DMIPS to TOPS, the paradigm shift Opening a new range of embedded AI applications



Figuur 2. De Neurale Verwerkingseenheid (NPU) opent nieuwe toepassingsgebieden.

Om de uiteenlopende behoeften van Edge-applicaties te ondersteunen, is de STM32N657 uitgerust met een uitgebreide set aan periferie (**figuur 2**). De dual-lane CSI-2 camera-interface en geïntegreerde H.264 encoder maken video-invoer en -compressie met hoge resolutie mogelijk, wat ideaal is voor computervisietaken. Het apparaat bevat 4,2 MB aaneengesloten SRAM, waardoor complexe modellen kunnen worden uitgevoerd zonder dat er extern geheugen nodig is, wat de latentie en het energieverbruik vermindert. Energiezuinige modi, zoals Sleep, Stop en Stand-by, maken de microcontroller zeer geschikt voor batterij gevoede of energiegevoelige toepassingen.

De STM32N657 integreert ook een breed scala aan analoge en digitale randapparatuur, waaronder twee 12-bits ADC's met bemonsteringsfrequenties tot 5 MSamples/s, een temperatuursensor en uitgebreide GPIO-ondersteuning voor interfacen met externe apparaten. Connectiviteitsopties zijn onder andere dual-USB, 1-Gbit Ethernet met TSN, I3C en meerdere UART, SPI en I2C kanalen, voor naadloze communicatie in embedded systemen.

Meer over de nieuwe STM32N6-controllerfamilie en het achterliggende software-ecosysteem is te vinden in onze AI Bonus Edition 2024, die men gratis kan downloaden op [1].

De STM32N6570-DK Development Kit

Om evaluatie, softwareontwikkeling en prototypen te vergemakkelijken, biedt STMicroelectronics een goed uitgeruste development kit. De STM32N6570-DK is een platform met veel mogelijkheden, waarmee ontwikkelaars toepassingen kunnen bouwen en testen variërend van AI-inferentie en multimedia tot industriële en IoT-oplossingen.

Op de voorgrond is de kaart voorzien van een 5" capacitief multitouch display dat tot vijf aanraakpunten ondersteunt en een intuïtieve interface biedt voor interactieve grafische toepassingen (**figuur 3**). De reactiesnelheid van het display maakt het ideaal voor het maken van gebruiksvriendelijke GUI's en monitoringsystemen. Connectiviteitsopties op het board zijn onder andere een RJ45 Ethernetpoort, ondersteund door een Realtek controller, die zorgt voor robuuste en snelle netwerkcommunicatie. Twee USB-poorten – een Type-A poort voor externe randapparatuur en een Type-C poort voor dataoverdracht – vergroten de flexibiliteit (**figuur 4**). Bovendien wordt programmeren en debuggen gestroomlijnd door een speciale USB Type-C poort voorzien van ST-LINK V3, waardoor efficiënte ontwikkelworkflows mogelijk zijn (**figuur 5**).

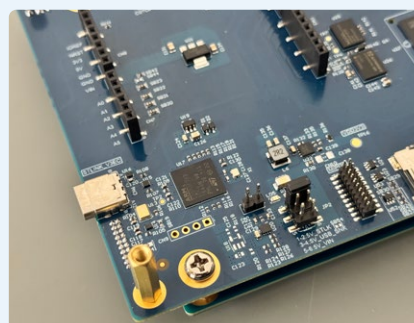
De uitbreidbaarheid van het board is een van de opvallende kenmerken. Het heeft de Arduino UNO R3 lay-out, waardoor het compatibel is met een groot aantal Arduino Shields. Voor extra randapparatuur bevat het board connectoren voor STMOD+, MIPI 2.0 en een bandkabelinterface voor cameramodules. Deze interfaces, gecombineerd



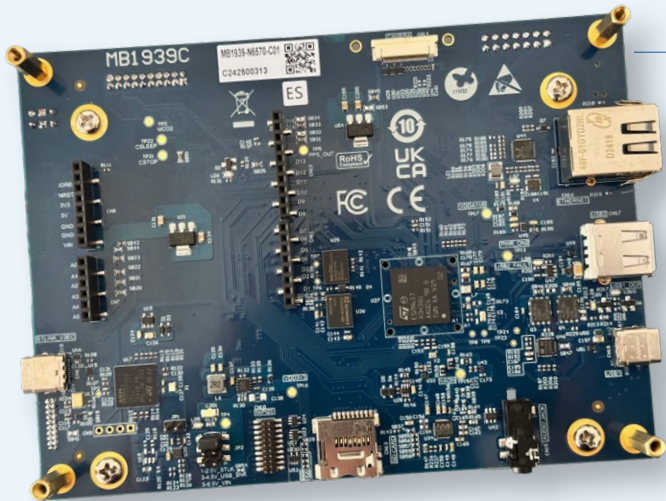
Figuur 3. De STM32N6570-DK Ontwikkelingskit.



Figuur 4. Aansluitmogelijkheden aan board.



Figuur 5. Speciale USB Type-C poort voor programmeren en debuggen.



Figuur 6. Achteraanzicht van het STM32N6570-DK-ontwikkelboard.



Figuur 7. Functies voor gebruikersinteractie op de STM32N6570-DK.

met een microSD kaartsleuf en een 3,5 mm koptelefoonaansluiting, bieden ontwikkelaars talloze mogelijkheden voor multimedia en opslag gebaseerde projecten (figuur 6).

Gebruikersinteractie en feedback komen aan bod met vier status-LED's, waaronder twee RGB-LED's, en drie knoppen, waarvan er één als reset-knop fungeert (figuur 7). Deze functies zijn van onschatbare waarde voor debuggen, realtime monitoring en aangepaste invoerverwerking. Voor video- en beeldverwerkingsprojecten ondersteunt de bandkabelconnector hoge-resolutie cameramodules, gebruikmakend van de ingebouwde videoverwerkingsmogelijkheden van de STM32N6570. Centraal op het board staat de STM32N6570 microcontroller, ontworpen voor high-performance Edge-AI en multimedia toepassingen. Om een betrouwbare werking te garanderen, zelfs bij intensieve werkbelasting, bevat het board montagepunten rond de microcontroller, die de bevestiging van een mogelijkheid voor koeling vergemakkelijken. Deze doordachte toevoeging biedt flexibiliteit voor thermisch beheer in veeleisende gebruikssituaties (figuur 8).

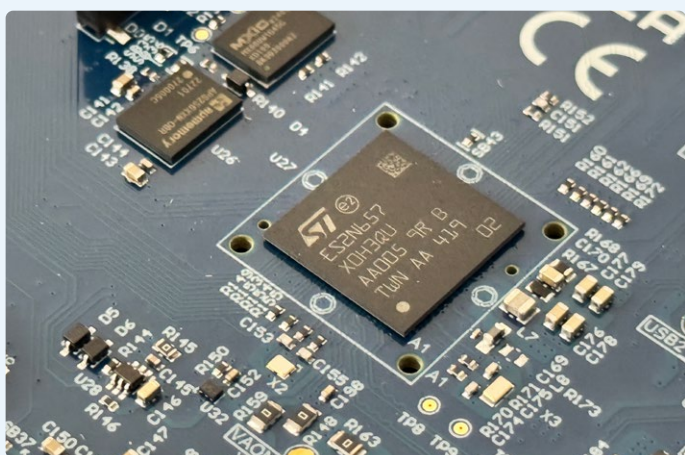
Naast het moederboard bevat de kit de ST AI Camera Module (figuur 9), waarmee ontwikkelaars direct aan de slag kunnen met AI-gestuurde beeldverwerkingstoepassingen zoals objectdetectie, gezichtsherkenning en meer. De cameramodule maakt gebruik van de ingebouwde videoverwerkingsmogelijkheden van de STM32N6570,

waardoor het een uitstekend hulpmiddel is voor het verkennen van Edge-computervisie.

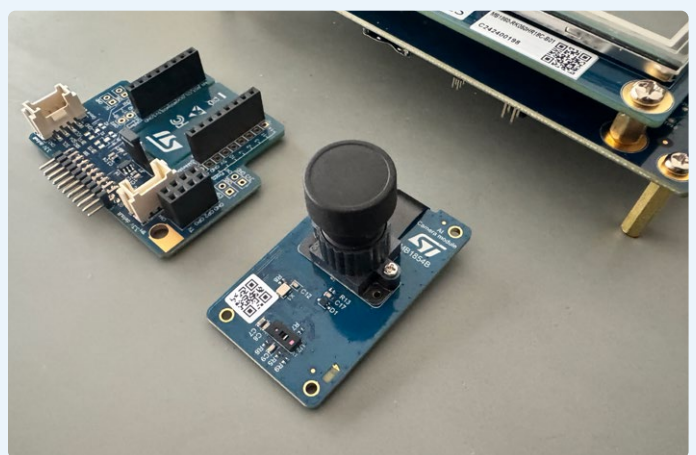
Een van de doordachtste onderdelen van de kit is de Fan-Out Board (figuur 10). Deze uitbreidingskaart wordt aangesloten via de STMOD+ interface en biedt ondersteuning voor de mikroBUS socket standaard, een veelgebruikte add-on board interface ontworpen voor maximale uitbreidbaarheid met minimaal gebruik van pinnen. Door de integratie van mikroBUS opent de fan-out board de deur naar duizenden Click boards van MIKROE, die plug-and-play oplossingen bieden voor sensoren, actuatoren, displays en communicatiemodules. Bovendien bevat het fan-out board twee Grove-connectoren, één geconfigureerd voor UART en de andere voor I²C, waardoor snel prototypen met het uitgebreide Grove-module-ecosysteem mogelijk is.

Omdat de STM32N6570 geen ingebouwde draadloze mogelijkheden heeft, biedt het fan-out board een speciale interface voor de Espressif ESP-01 Wi-Fi-modules, zodat draadloze communicatiefuncties naadloos geïntegreerd kunnen worden.

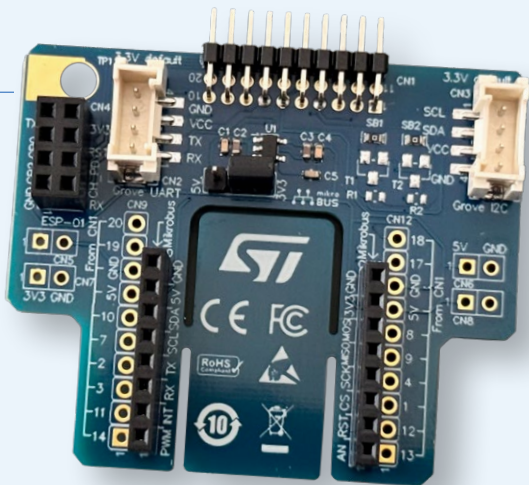
Als ingenieur in embedded systemen voelt deze opname van een fan-out board als een gamechanger. Het elimineert de noodzaak voor speciaal ontworpen adapter boards – een veel voorkomende stap die ontwikkelaars moeten nemen wanneer ze sensoren of modules proberen te interfaceren met een ontwikkelboard. Door dit toe te voegen heeft



Figuur 8. STM32N6570 microcontroller met bevestigingspunten voor koelingsoptie.



Figuur 9. ST AI-cameramodule.



Figuur 10. De Fan-Out Board en Grove-connectoren in de STM32N6570-DK vereenvoudigen snel prototypen en sensorintegratie.

STMicroelectronics ontelbare uren installatietijd bespaard, waardoor ontwikkelaars zich kunnen richten op hun eigenlijke projecten in plaats van op het oplossen van connectiviteitsproblemen. Samen maken het hoofdontwikkelboard, de AI-cameramodule en het Fan-Out Board de STM32N6570-DK tot een allesomvattende toolkit. Met deze tools bij de hand kunnen ontwikkelaars snel prototypes maken en een breed scala aan toepassingen testen, van AI-gestuurde Edge-systemen tot IoT-apparaten, multimedia-interfaces en meer. Deze ontwikkelkit biedt niet alleen krachtige functies, maar legt ook de nadruk op gebruikersgemak, zodat ingenieurs meer tijd kunnen besteden aan innovatie en minder tijd aan het oplossen van hardware-uitdagingen. Meer over deze goed uitgeruste kit is te vinden op een webpagina van STMicroelectronics [2].

De STM32 Edge-AI-Contest

Een spannende kans voor ontwikkelaars en technici om hun vaardigheden te laten zien: STMicroelectronics en Elektor hebben de handen ineengeslagen voor de *STM32 Edge-AI-Contest*. Of u nu gepassioneerd bent door IoT, robotica, domotica, beveiliging of anomaliedetectie, de mogelijkheden zijn eindeloos. De STM32N6570-DK biedt alle tools die u nodig hebt om baanbrekende toepassingen te maken, van de Neural-ART Accelerator en geavanceerde grafische mogelijkheden tot de veelzijdige connectiviteitsopties. De wedstrijd moedigt deelnemers aan om buiten de gebaande paden te denken, de ontwikkelkit creatief te gebruiken en de mogelijkheden te demonstreren in real-world scenario's.

Deze wedstrijd is niet alleen een platform om te innoveren, maar biedt u ook de kans om een deel van de € 5000 aan prijzen te winnen. Het is de perfecte gelegenheid om uw ideeën te testen, uw ontwikkelvaardigheden te verfijnen en erkenning te krijgen in de embedded systeemgemeenschap.

Laat uw creativiteit de vrije loop, heb plezier en breng uw ideeën tot leven met de STM32-N6 Development Kit. Of het nu gaat om een baanbrekend AI-aangedreven domoticasysteem, een smart home-oplossing of een nieuwe IoT-toepassing, de wedstrijd is uw podium om een stempel te drukken op de wereld van Edge-AI! ◀

Willem den Hollander – 240708-03



Deelnemen aan de STM32 Edge-AI-Contest

Voor ontwikkelaars (zowel professionals, makers als studenten zijn welkom) die willen deelnemen aan deze wedstrijd stelt STMicroelectronica 100 gratis STM32N6570 Development Kits beschikbaar. Om in aanmerking te komen voor een board, dient u uw projectidee in op de Elektor website:

www.elektormagazine.com/stm32ai



Deze fase van de wedstrijd eindigt op 28 februari 2025

Om deel te nemen aan de wedstrijd en kans te maken op een prijs, moet u voor 30 april 2025 documentatie voor uw project indienen. Meer informatie is ook te vinden op de bovenstaande link.

Prijzen:

1^e prijs: € 2500

2^e prijs: € 1500

3^e prijs: € 1000

Ga nu aan de slag en maak uw innovatieve ideeën werkelijkheid met de STM32N6!

WEB LINKS

[1] "High-Performance Edge AI: The New STM32N6," Elektor AI Digital Bonus Edition 2024: <https://elektormagazine.com/embedded-ai>

[2] Discovery kit with STM32N6570X0 MCU, STMicroelectronics: <https://st.com/en/evaluation-tools/stm32n6570-dk.html>

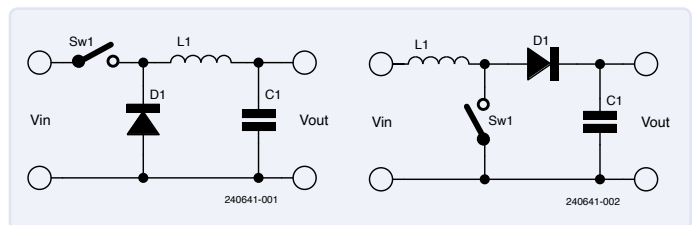
Vergroten van de bandgap

daarom is er zoveel interesse in SiC en GaN

Stuart Cording (Duitsland)

Silicium-halfgeleiders zoals MOSFET's en IGBT's zijn sinds hun commercialisering de pijlers van de elektronica-industrie. In de afgelopen tien jaar hebben echter halfgeleiders met een bredere bandgap zoals SiC en GaN hun intrede gedaan. Wat zijn dat voor componenten en waarom is de industrie er zo enthousiast over?

Iedereen kent de impact die silicium-MOSFET's hebben gehad op de elektronica-industrie. Maar tenzij u een grote interesse hebt in vermogensomvormers, bent u zich misschien niet bewust van de toepassingsspecifieke veranderingen die de halfgeleiderindustrie heeft doorgevoerd om ze te verbeteren en waarom. Switched-mode power supplies (SMPS) bestaan al sinds de jaren '60, toen ze werden gebruikt in ruimtevaarttoepassingen zoals de Apollo Guidance Computer [1] en vroege satellieten. Ze werden ontwikkeld uit de behoefte om spanningen efficiënter om te zetten dan lineaire regelaars dat kunnen. Zelfs de vroege BBC Micro uit de jaren '80 verruilde zijn lineaire voeding snel voor een SMPS na de lancering.

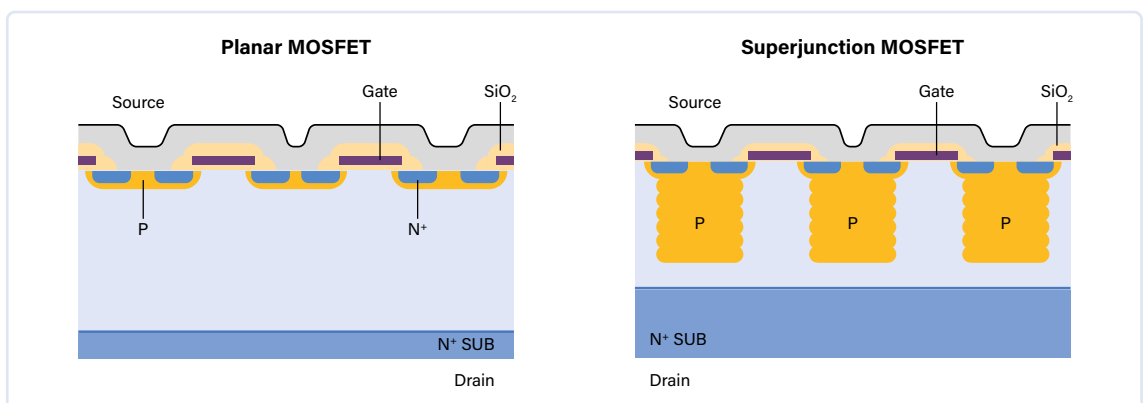


Figuur 1. Schakeling voor een buck- (links) en boost- (rechts) converter, twee van de basis-omvormerarchitecturen.

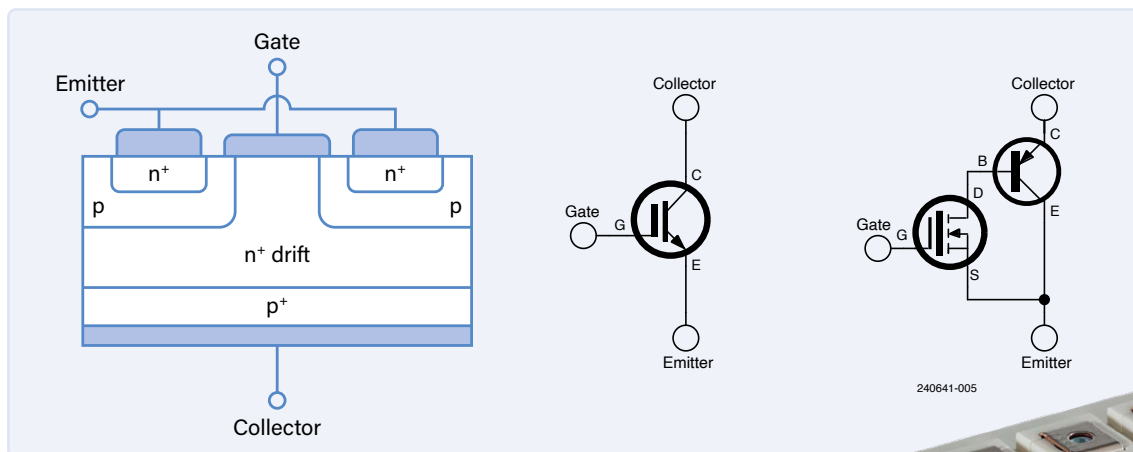
Schakelende omvormers zetten hun vermogensschakelaars snel aan en uit om de ingangsspanning om te zetten in de gewenste uitgangsspanning. Samen met een condensator en spoel wordt deze gehakte ingangsspanning gefilterd om die te stabiliseren. Afhankelijk van het ontwerp kan de uitgang lager (buck) of hoger (boost) zijn dan de ingang (**figuur 1**). Een terugkoppellus regelt de aan/uit-verhouding, waardoor de omvormer kan reageren op veranderingen in de belasting terwijl de variatie in de gewenste uitgangsspanning wordt geminimaliseerd.

Superjunction-MOSFET's en -IGBT's

Naarmate de nominale spanning van planaire MOSFET's toeneemt, neemt de inschakelweerstand toe, waardoor in de transistor meer energie in warmte wordt omgezet. Superjunction-MOSFET's werden ontwikkeld om deze beperking te overwinnen bij gebruik



Figuur 2. Verschil tussen planaire (links) en superjunction (rechts) MOSFET's (bron: ROHM Semiconductor).



Figuur 3. Doorsnede van een IGBT met symbool en vervangingschema.

in schakelende omvormers (figuur 2). Superjunction-componenten bieden ook een kortere reverse recovery-tijd [2] en een lagere gate- en uitgangslading. Deze verbeteringen zorgen voor verdere reductie van de verliezen en dragen bij aan het verminderen van problemen op het gebied van elektromagnetische interferentie (EMI), wat vooral belangrijk is naarmate de schakelfrequentie toeneemt.

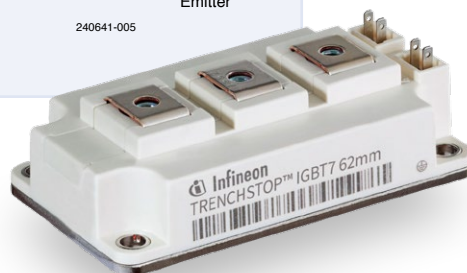
MOSFET's houden echter hun beperkingen met betrekking tot de maximale spanning en het maximale vermogen die ze kunnen verwerken. Zware industriële motoren en windturbines zijn echter ook toepassingen die kunnen profiteren van ontwerpen met geschakelde omvormers. Voor deze toepassingen werden bipolaire transistoren met geïsoleerde gate (IGBT's) ontwikkeld. Met een NPN-ontwerp lijken deze op een thyristor met een metaaloxidegate (figuur 3).

Dankzij dit ontwerp zijn ze bestand tegen spanningen van meer dan 6 kV en ondersteunen ze schakelfrequenties tussen 2 kHz en 50 kHz. Hoewel het bereik van de schakelfrequentie lager is dan dat van een MOSFET (dat meestal tot 1 MHz loopt), wordt dit ruimschoots gecompenseerd door hun robuustheid, vermogen en spanningsbereik. Daarom worden ze toegepast in variabele frequentieaandrijvingen (VFD's), laders voor elektrische voertuigen (EV), inductiever verwarmingssystemen zoals kookplaten en lasapparatuur. Om een idee te krijgen van het soort toepassingen waarin deze apparaten worden gebruikt, hoeft u alleen maar te kijken naar hun massieve keramische behuizingen, compleet met montagegaten met schroefdraad voor de elektrische aansluitingen (figuur 4) – een heel verschil met uw typisch TO-220-torretje!

Uitdagingen bij schakelende omvormers

Engineers proberen een reeks doelen te bereiken met nieuwe ontwerpen van schakelende omvormers. Een daarvan is vermogensdichtheid, meestal uitgedrukt in kW/l. Indirect duidt dit ook op een lager gewicht omdat de gebruikte componenten nog steeds van dezelfde materialen zijn gemaakt. De schakelfrequentie levert hier een belangrijke bijdrage aan omdat, naarmate de frequentie toeneemt, de grootte van de benodigde passieve componenten (condensatoren en spoelen) afneemt.

Bij de PFC (Power Factor Correction) bijvoorbeeld kan de DC-link-condensator tussen 20% en 50% van het beschikbare



Figuur 4. Een 1200 V, maximaal 800 A TRENCHSTOP IGBT-module van Infineon van 62x107x31 mm met M5/M6-schroefdraadaansluitingen (bron: Infineon Technologies AG).

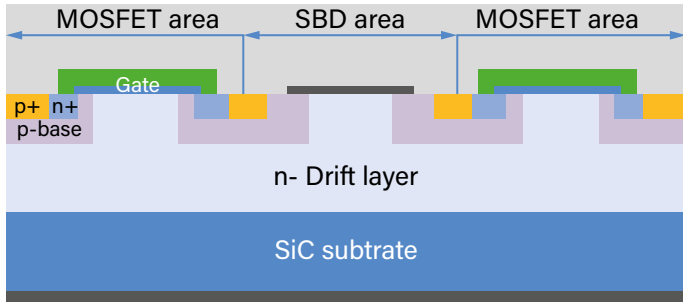
volume innemen. Een hogere schakelfrequentie kan hier veel voordelen brengen.

Pogingen om de dichtheid te verhogen worden bemoeilijkt door het risico op oververhitting als alles dichter op elkaar is gepakt. Dit is een probleem bij IGBT's en MOSFET's, die beide gevoelig zijn voor het thermische sneeuwbaaleffect. Als het ontwerp tegen een thermische grens aanloopt, kan geforceerde koeling worden overwogen. Dit verhoogt echter de kosten en het volume en kan problemen op toepassingsniveau veroorzaken.

Industriële toepassingen, waar veel schakelende omvormers en motoromvormers worden gebruikt, hebben baat bij kleinere, lichtere systemen die in ruwe omgevingen kunnen worden ingezet. Vaak impliceert dit een hermetisch gesloten oplossing, wat betekent dat geforceerde koeling geen optie is. Zelfs exploitanten van windturbines willen graag oudere apparatuur vervangen door iets dat kleiner en lichter is, omdat dit gemakkelijker te installeren is en mogelijk minder warmte genereert, ondanks het feit dat er



Figuur 5. Windturbines (links) en frequentieregelaars (rechts) kunnen profiteren van innovaties bij vermogensomzetters (bron: Adobe Stock).



Figuur 6. Dwarsdoorsnede door een SiC-MOSFET (bron: Toshiba Electronics Europe GmbH).

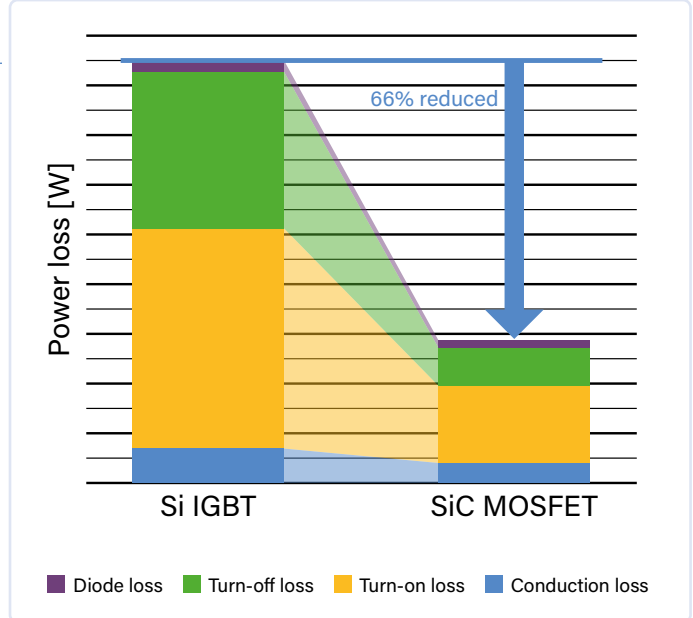
veel ruimte beschikbaar is nadat de oude apparatuur is verwijderd (figuur 5).

Siliciumcarbide-MOSFET's

Er zijn nu twee belangrijke WBG-halfgeleidertechnologieën (Wide Bandgap) beschikbaar. De eerste is siliciumcarbide, meestal tot SiC afgekort (figuur 6). Het 'wide' in WBG verwijst naar het feit dat de bandgap bij deze componenten breder is dan bij silicium. De bandgap voor silicium is 1,12 eV, terwijl dat voor SiC ongeveer 3,26 eV is, afhankelijk van het gebruikte kristalrooster [3]. Dit geeft SiC een hoger elektrisch doorslagveld van $2,8 \times 10^6$ V/cm vergeleken met $3,0 \times 10^5$ V/cm voor silicium. SiC biedt ook een aanzienlijk hoger warmtegeleidingsvermogen van 4,9 W/cmK dan silicium met 1,5 W/cmK.

SiC-halfgeleiders worden geleverd door de bedrijven die al bekend zijn van IGBT's, zoals Toshiba, Infineon, STMicroelectronics, Rohm en minder bekende spelers zoals Wolfspeed. Ze worden meestal geleverd in spanningsklassen van 650 V, 1200 V en soms 1700 V. Dit maakt ze een geschikt alternatief voor IGBT's in dit spanningsbereik, waarbij de fabrikanten ze aanbevelen voor fotovoltaïsche omvormers, energieopslagsystemen, laders voor EV's, voedingen en motoraandrijvingen. Ze worden ook steeds vaker aangeboden in lagere spanningsklassen (400 V), waardoor ze meer en meer een alternatief vormen voor superjunction-MOSFET's.

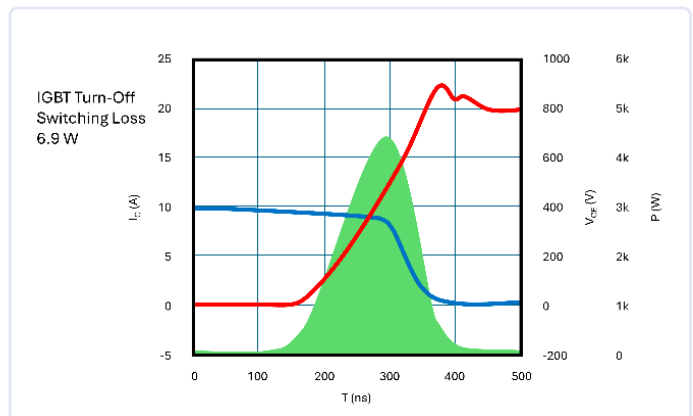
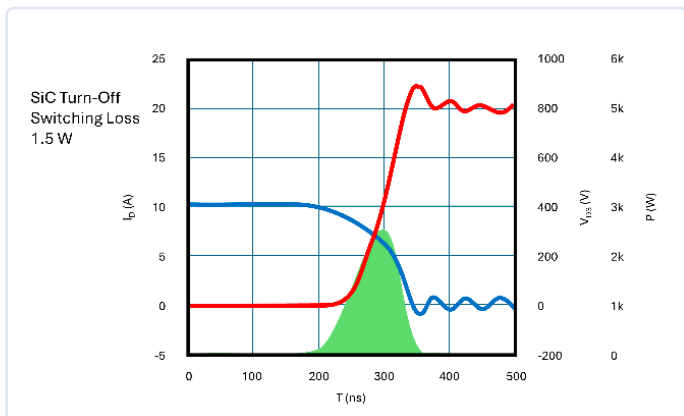
Door hun thermische eigenschappen zijn ze zeer geschikt voor ontwerpen met hogere dichtheid. De aan-weerstand $R_{DS(ON)}$ van silicium MOSFET's kan meer dan 1,5 keer hoger worden wanneer ze hun bedrijfstemperatuur bereiken. Dit resulteert in meer verliezen en warmte-ontwikkeling. Ter vergelijking: de $R_{DS(ON)}$ van een vergelijkbare SiC-MOSFET neemt slechts 1,13 keer toe. Aangezien de $R_{DS(ON)}$ gespecificeerd is bij 25 °C, maar de toepassing bij een hogere



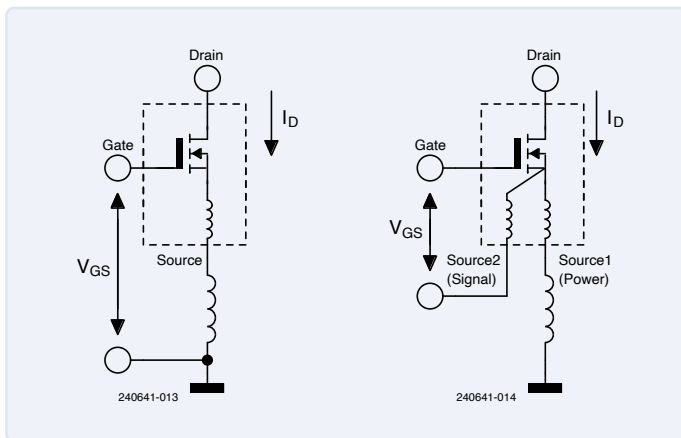
Figuur 8. Het gebruik van de nieuwste generatie SiC-MOSFET's kan de vermogensverliezen met 66% verminderen in vergelijking met een ontwerp op basis van IGBT's (bron: Toshiba Electronics Europe GmbH).

temperatuur zal werken, kan een SiC-MOSFET met een hogere $R_{DS(ON)}$ een silicium MOSFET met een lagere $R_{DS(ON)}$ vervangen. De thermische eigenschappen van SiC-MOSFET's betekenen ook dat ze in de toepassing heter kunnen werken dan alternatieve halfgeleiders (junctietemperaturen tot 175 °C).

De verliezen worden toegeschreven aan de inschakel-, uitschakel-, diode- en geleidingskarakteristieken van het apparaat. Vergelijken met IGBT's vertonen SiC-MOSFET's aanzienlijke verbeteringen met betrekking tot de schakelverliezen. Als een IGBT bijvoorbeeld wordt ingeschakeld, neemt de stroom door de component snel toe, maar het duurt even (enkele honderden nanoseconden) voordat de spanning over de component afneemt. Tijdens het uitschakelen is een soortgelijk tegenovergesteld effect te zien (figuur 7). Deze 'tail currents' veroorzaken vermogensverliezen die de efficiëntie van de vermogensomzetter verminderen. Hoewel SiC-MOSFET's het probleem van de tail currents niet helemaal wegnemen, is aangetoond dat het gebruik ervan de schakelverliezen met meer dan 60% vermindert ten opzichte van een vergelijkbaar ontwerp op basis van IGBT's (figuur 8).



Figuur 7. Vergelijking van het vermogensverlies bij uitschakelen: bij een SiC MOSFET (links) en bij een IGBT (rechts). De spanning is rood, de stroom is blauw en het vermogen is groen (bron: Toshiba Electronics Europe GmbH).



Afbeelding 9: Een Kelvin-source- of sense-pin is vaak te vinden op discrete vermogenscomponenten om een stabielere gate/source- of basis/emitter-spanning te verkrijgen (bron: Toshiba Electronics Europe GmbH).

Aansturing van SiC-MOSFET's

De $R_{DS(ON)}$ wordt gegeven als een reeks waarden in de datasheet van een SiC-MOSFET voor verschillende gatespanningen (V_{GS}), drainstromen en temperaturen. Het is belangrijk dat V_{GS} de opgegeven hoogste waarde bereikt, meestal 18 V, anders wordt de beoogde $R_{DS(ON)}$ niet gehaald, wat leidt tot hogere verliezen. Hoewel het eenvoudig genoeg lijkt, is het regelen van een signaal van enkele tientallen of honderden kilohertz aan de gate van een halfgeleider waar tientallen ampères doorheen lopen niet bepaald eenvoudig. Problemen kunnen worden veroorzaakt door de zelfinductie van de bedrading in de behuizing van de MOSFET tussen de source op de halfgeleider-die en de source-pin van de behuizing. Met de hoge stromen die tijdens bedrijf heen en weer gaan, treden er grote variaties op in de gate/source-spanning. Om dit te compenseren wordt een Kelvin-source-pin (soms Kelvin-sense-pin genoemd) toegevoegd en gebruikt als source-referentie (figuur 9). Deze belastingvrije verbinding tussen een extra pin van de behuizing en de source op de die zorgt voor een meer stabiele gate/source-spanning. Opgemerkt moet worden dat de Kelvin-source niet is voorbehouden aan SiC-halfgeleiders; het is een kenmerk is van veel halfgeleiders die worden gebruikt in toepassingen met hoog vermogen. Gate-drivers [4] zetten de logische uitgangssignalen van de controller (meestal wordt een microcontroller gebruikt) om in de spanning en stroom die nodig zijn om de gate van de SiC-MOSFET

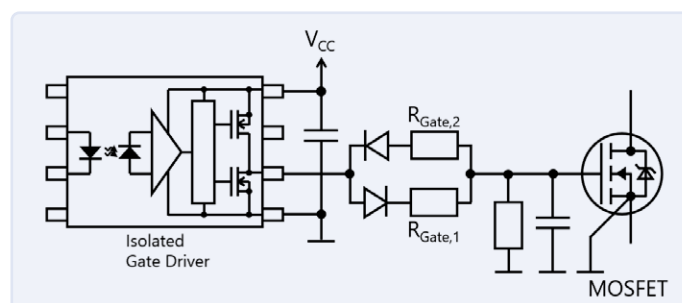
aan te sturen, meestal met piekstromen van enkele ampères. Vanwege de hoge systeemspanningen die worden geschakeld, isoleren de geïsoleerde gate drivers (opto-isolatoren) de stuurlogica van de spanning die wordt geschakeld. Ze gebruiken meestal de Kelvin-source-pin als massareferentie.

Onafhankelijke regeling van de in- en uitschakelsnelheid is ook belangrijk, wat leidt tot het gebruik van antiparallel geschakelde diodes plus weerstanden in het pad naar de gate (figuur 10). Een van de diodes en weerstanden kan weggelaten worden, afhankelijk van de toepassing. Sommige gate-drivers hebben zelfs aparte aansluitingen voor in- en uitschakelen.

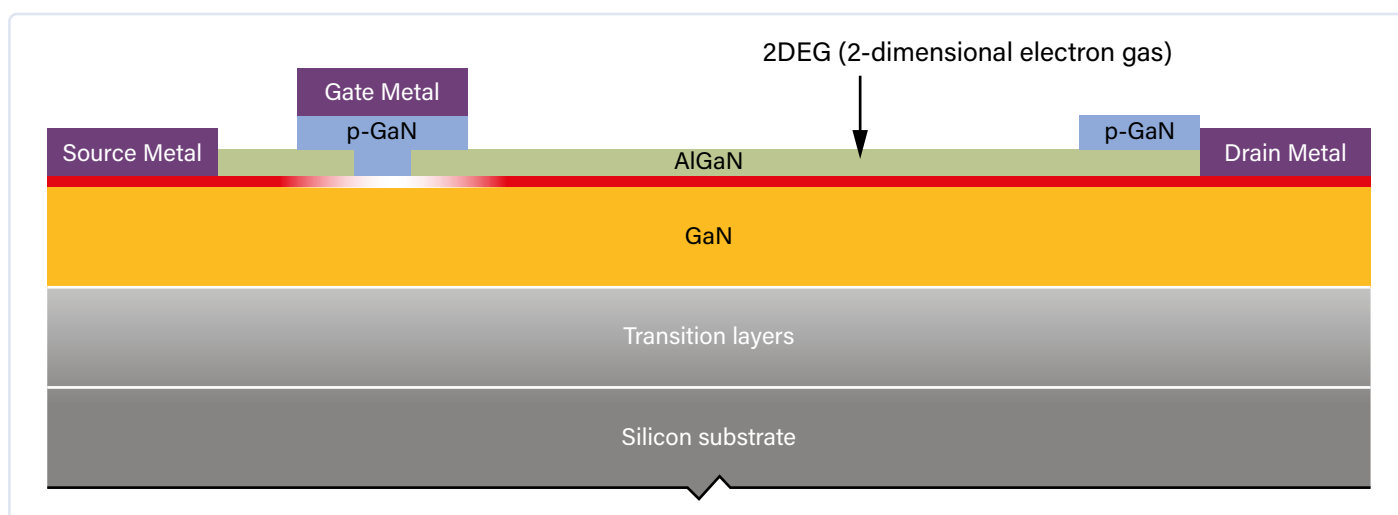
SiC kan ook slecht reageren op negatieve gatespanningen. Infineon raadt aan ervoor te zorgen dat de gatespanning niet onder $-2,0$ V daalt, omdat dit na verloop van tijd drift in V_{GS} kan veroorzaken. Dit leidt tot een toename van $R_{DS(ON)}$ gedurende vele bedrijfsuren. Om deze reden kan een zenerdiode worden toegevoegd tussen de Kelvin-source en de gate.

GaN-transistoren

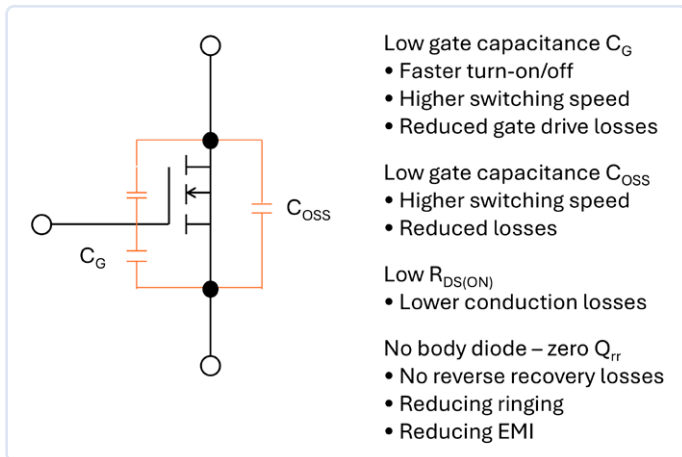
De tweede WBG-halfgeleider is galliumnitride, bekend als GaN, een transistor met hoge elektronenmobiliteit (HEMT). Deze wordt gevormd door een laag aluminium-galium-nitride (AlGaN) op



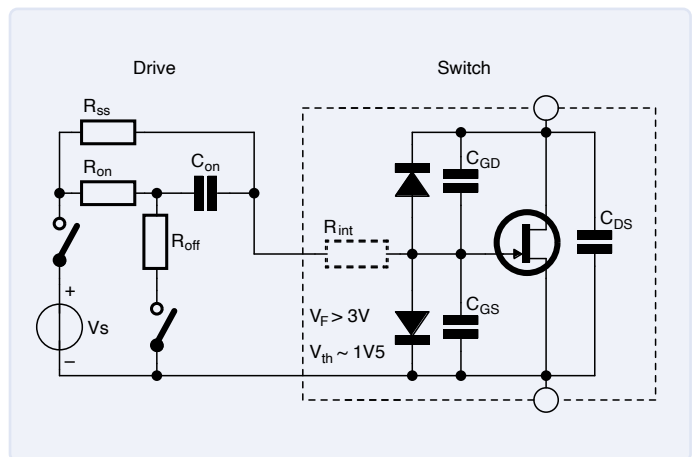
Figuur 10. Antiparallele diodes met weerstanden in het gate-pad maken het mogelijk om de in- en uitschakelkarakteristieken onafhankelijk te regelen (bron: Toshiba Electronics Europe GmbH).



Figuur 11. Dwarsdoorsnede van een CoolGaN HEMT (bron: Infineon Technologies AG).



Figuur 12. GaN geeft minder verliezen bij schakeltoepassingen in vergelijking met silicium, waardoor efficiëntere en compactere vermogensomvormers mogelijk worden (bron: Texas Instruments).



Figuur 13. De driverschakeling voor de gate van een GaN-halfgeleider is vrij ingewikkeld vergeleken met dat voor andere vermogenshalfgeleiders (bron: Infineon Technologies AG).

een laag GaN-materiaal, waartussen zich een tweedimensionaal elektrongas (2DEG) vormt (figuur 11). Hun belangrijkste voordeel is het ontbreken van de reverse recovery-lading Q_{rr} , die wordt veroorzaakt door de substraatdiode in MOSFET's maar die geen deel uitmaakt van een GaN-halfgeleider. Dit vermindert verliezen en uitslingering op het geschakelde knooppunt, waardoor de EMI verbetert (figuur 12).

Met een bandgap van 3,39 eV is GaN vergelijkbaar met, maar hoger dan SiC-halfgeleiders. GaN-transistoren hebben ook een vergelijkbaar elektrisch doorslagveld van $3,3 \times 10^6$ V/cm. Waar ze sterk van elkaar verschillen is hun thermische geleidbaarheid, die met 2,0 W/cmK dichterbij silicium ligt dan bij SiC.

Infineon is ook een belangrijke leverancier van GaN-transistoren, samen met Nexperia en Rohm. Er zijn ook kleinere spelers die de voordelen van GaN benutten om te innoveren op het gebied van energieomzetting, zoals Efficient Power Conversion Corporation (EPC). De concurrentie in deze markt is echter zo groot dat veel kleinere fabrikanten al zijn overgenomen door de grotere traditionele spelers, waarbij Transphorm onlangs is overgenomen door Renesas en GaN Systems is opgekocht door Infineon.

De toepassingen die GaN zo aantrekkelijk maken zijn voedingen voor commerciële servers en laders voor telefoons en laptops. Dankzij de unieke eigenschappen is GaN snel doorgedrongen tot deze apparaten, waardoor consumenten aanzienlijk kleinere voedingen kunnen meenemen met hun computerapparatuur. In feite benadrukken veel fabrikanten van smartphone-laders dat hun apparaten GaN gebruiken, waarbij ze het gebruik ervan als marktvoordeel gebruiken.

Er zijn twee types beschikbaar. De depletion-mode- of d-mode-transistoren zijn altijd ingeschakeld en hebben een negatieve spanning nodig om uit te schakelen. Een transistor die altijd aan is, is in een schakelende voeding moeilijk te gebruiken, omdat er stroom loopt voordat het regelcircuit klaar is om de transistor uit te schakelen. De GaN-transistor die de voorkeur geniet voor een omvormer is de enhancement-mode- of e-mode-transistor die zo is ontworpen dat die normaliter uitgeschakeld is.

Er zijn GaN-halfgeleiders beschikbaar die spanningen tot ongeveer

800 V weerstaan en junctietemperaturen tot 150 °C. De gate/source-overgang ziet eruit als een pn-diode en de gate-drempelspanning $V_{GS(TH)}$, die nodig is om de transistor in te schakelen, kan vrij laag zijn, rond 1,5 V bij een gateweerstand van een paar ohm. Als gevolg hiervan kan hde driverschakeling veel uitdagender zijn dan die welke gebruikt wordt in de silicium MOSFET-toepassing waarvoor GaN een vervanging is.

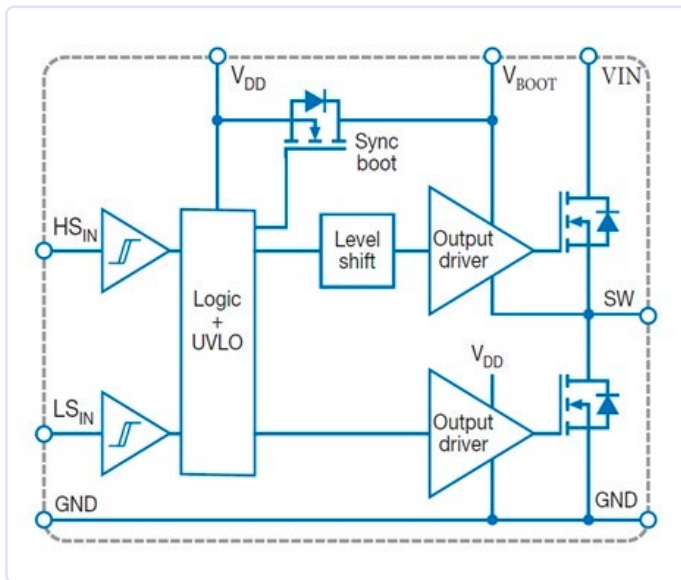
De uitdagingen worden nog vergroot door de hoge schakelfrequenties tot 10 MHz die de transistoren ondersteunen. Zoals al is benadrukt, is deze eigenschap van speciaal belang omdat hierdoor passieve componenten met een kleinere omvang kunnen worden gebruikt.

GaN-HEMT aansturen

De diode-achtige ingang aan de gate maakt het aansturen van GaN-halfgeleiders tot een uitdaging. Wanneer de stuurspanning wordt aangelegd, stijgt deze tot de voorwaartse spanning V_F van deze diode wordt bereikt. Hierna moet de halfgeleider in de aan-toestand worden gehouden. Sommige transistoren hebben ook een negatieve spanning aan de gate nodig om ze uit te schakelen.

Infineon stelt een eenvoudige schakeling voor bestaande uit drie weerstanden en een condensator om hun e-mode GaN HEMT's aan te sturen. Via een serieweerstand en een condensator wordt een stuurspanning van 8...10 V aangelegd op de gate, wat zorgt voor de stroom in de overgangsfase. Parallel zorgt een extra weerstand voor de vereiste constante diodestroom in de aan-toestand. Het uitschakelproces wordt in gang gezet door de condensator via een weerstand met massa te verbinden. De spanning over deze condensator, gecombineerd met de spanning over de interne gate/source-capaciteit van de GaN-transistor, levert een negatieve gatespanning V_G om de transistor weer uit te schakelen (figuur 13). Net als voor SiC-transistoren hebben speciale geïsoleerde GaN-gatedrivers aparte pinnen voor inschakelen en uitschakelen. De behuizingen van discrete GaN-transistoren hebben waar nodig ook een Kelvin-source-pin.

Vanwege de uitdagingen bij het optimaal ontwerpen van schakelingen met GaN-transistoren is EPC begonnen met het aanbieden van



Figuur 14. Deze halve-brug integreert GaN-FET's en de benodigde gate-drivers in een piepkleine behuizing van 3,9x2,6 mm (bron: Efficient Power Conversion Corporation).

hun GaN-FET's met geïntegreerde drivers (figuur 14), waaronder halve-brug vermogenstrappen zoals de EPC2152 [5]. Deze vereenvoudigen het ontwerp van vermogensomvormers en lossen veel van de besturings- en EMI-problemen op, terwijl ze schakeltijden van 1 tot 2 ns mogelijk maken. Deze verschuiving naar meer geïntegreerde oplossingen is een traditionele strategie in de halfgeleiderindustrie, maar op dit moment onderscheidt EPC zich in dit opzicht van andere GaN-spelers.

Kleiner, dichter, lichter, efficiënter

Ontwerpers van vermogensomvormers zijn voortdurend op zoek naar manieren om hun producten efficiënter en compacter te maken. WBG-halfgeleiders zoals SiC en GaN kunnen een stap voorwaarts betekenen in vergelijking met superjunction-MOSFET's en IGBT's in de juiste toepassingen en bij gebruik van de juiste topologieën.

GaN biedt de hoogste schakelfrequentie, wat betekent dat die traditioneel logge spoelen en condensatoren fors kleiner kunnen

worden, waardoor het volume, het gewicht en de materiaalkosten afnemen. Ze worden momenteel gezien als vervanging voor superjunction-MOSFET's, gericht op servers en consumenten-voedingstoepassingen. SiC wordt voornamelijk gezien als een alternatief voor IGBT's en wordt ingezet in industriële toepassingen die behoefte hebben aan kleinere volumes, efficiëntere stroomomvormers en robuuste motoromvormers.

Wat grootschalige toepassing nog tegenhoudt, zijn de kosten van de halfgeleiders in vergelijking met de alternatieven. Zowel SiC als GaN blijven duurder dan de IGBT of silicium-MOSFET die ze vervangen. Leveranciers proberen vaak een kostenanalyse op systeemniveau te bieden die rekening houdt met de lagere kosten voor de passieve componenten. Daarnaast zijn er andere voordelen waar klanten voor kunnen betalen. Een compactere servervoeding kan innovatie in de rest van het ontwerp mogelijk maken, of een hogere efficiëntie kan energiebesparingen opleveren die de hogere investering vooraf rechtvaardigen. De halfgeleiderindustrie reageert ook door te investeren in hun productieprocessen en om de componentkosten voor deze opwindende nieuwe WBG-halfgeleiders te verlagen. Eén ding is zeker – WBG is een blijvertje en zal de energieomvormerindustrie blijvend veranderen. ◀

240641-03



Over de auteur

Stuart Cording is een ingenieur en journalist met meer dan 25 jaar ervaring in de elektronica-industrie. Hij is gespecialiseerd in videocontent en richt zich op technische verdieping en inzicht. Hierdoor is hij vooral geïnteresseerd in de technologie zelf, hoe deze in eindtoepassingen past en voorspellingen over toekomstige ontwikkelingen. U kunt veel van zijn recente Elektor-artikelen vinden op www.elektormagazine.com/cording.

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.

WEBLINKS

- [1] "Inside the Apollo Guidance Computer's Core Memory," Ken Shirriff's blog: <https://www.righto.com/2019/01/inside-apollo-guidance-computers-core.html>
- [2] "What Determines Reverse Recovery Time in MOSFETs," Cadence PCB Solutions: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/what-determines-reverse-recovery-time-in-mosfets>
- [3] "What is a wide-band-gap semiconductor?," Toshiba: https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/knowledge/faq/diode_sic-sbd/sic-sbd001.html
- [4] Stuart Cording, "Why Do MOSFETs Need Drivers?," [elektormagazine.com](http://www.elektormagazine.com), May 2022: <https://www.elektormagazine.com/articles/why-do-mosfets-need-drivers>
- [5] EPC2152: 80 V, 15 A ePower™ Stage: <https://epc-co.com/epc/products/gan-fets-and-ics/epc2152>

Powerbank voor notebook

geef uw oude laptop een tweede leven

Laurent Labbe (Frankrijk)

Als de accu van uw notebook is overleden – en misschien niet meer in de handel verkrijgbaar is – of er een storing in de laadschakeling zit, dan is dit project misschien iets voor u. Het is een backup-stroomvoorziening waarmee u de werksessie op uw computer gedurende korte periodes open kunt houden wanneer u hem van de ene naar de andere kamer verplaatst, of urenlang op standby kunt houden zonder hem opnieuw op het lichtnet aan te moeten sluiten.

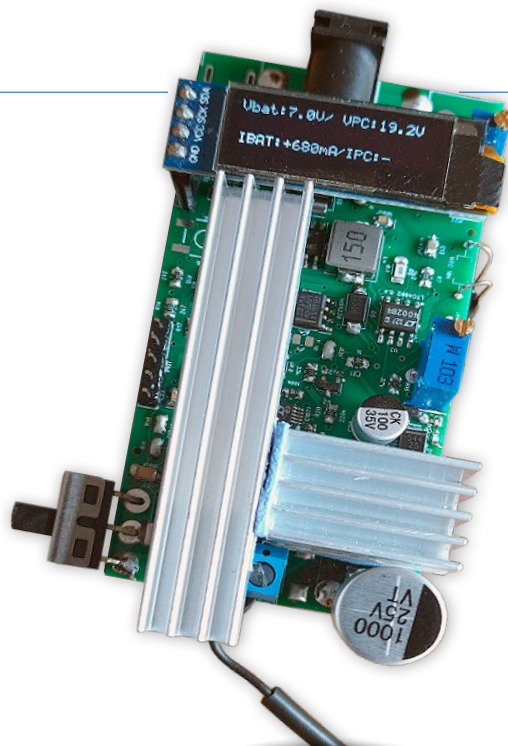
Zoals zo vaak komen veel nieuwe projecten voort uit een speciale behoefte. Sinds twee jaar werkt het notebook van mijn vrouw zonder accu en werd hij altijd gevoed door een externe voeding.

Natuurlijk heb ik geprobeerd de accu te vervangen, maar het probleem bleef bestaan. Het defect zat op het moederbord en was niet gemakkelijk te repareren. Dus stelde ik haar voor om een externe voeding te ontwerpen met ingebouwde accu's, zodat ze de computer kon verplaatsen zonder haar werksessie te verliezen.

Het oorspronkelijke ontwerp

Het eerste ontwerp werd opgebouwd met een aantal standaardmodules:

- een DC/DC boost-module van 3 A met een LTC1871 van Analog Devices, die de spanning verhoogt van 8,4 V (twee 18650-cellen in serie) naar 19 V;
- één module op basis van LM317 voor het laden van de accu's wanneer de externe voeding wordt aangesloten;
- een DC/DC buck-converter van een externe voedingsbron om de laadmodule te voeden.



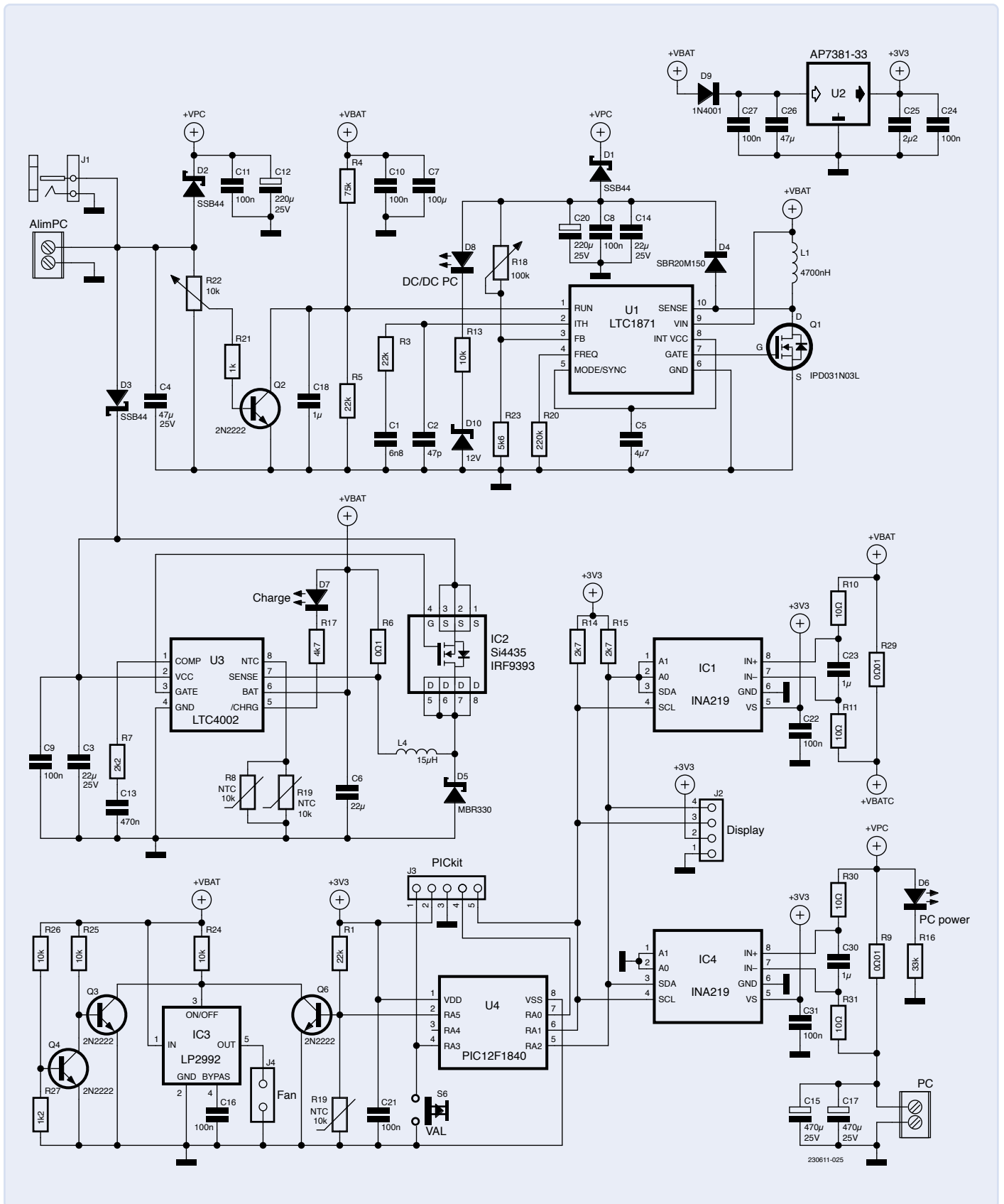
Al met al werkte dit goed op haar notebook, maar ze vond het te omvangrijk. Ook was de gebruikte boost-module ontworpen voor een uitgangsstroom van 3 A, maar als in de werkelijke wereld het spanningsverschil tussen IN en OUT te groot is (zoals in dit geval), wordt de uitgangsstroom beperkt tot 2 A. Dit werkte nog steeds goed op haar notebook, maar niet op de mijne, die 3,2 A wil hebben. Het verschil zou verklaard kunnen worden doordat mijn computer 2 A nodig heeft voor het hardwareplatform zelf en minstens 1 A voor het laden van de accu. Op haar notebook, zonder werkende laadschakeling, was een stroom van 2 A voldoende. Verder was er alleen een display met ingangs- en uitgangsspanningen, maar geen enkele informatie over de stroom.

Dat was het uitgangspunt van dit project, dat me ertoe bracht een notebook-powerbank te herontwerpen met deze bijkomende eisen:

- gebruik van twee 18650-cellen met de hoogst mogelijke capaciteit (LG in mijn geval);
- uitgangsspanning en -stroom tot 20 V, 3 A;
- compact ontwerp, met footprint van 2 x 18650;
- display met weergave van spanning en stroom IN (accu) en OUT (notebook-voeding).

Ontwerpkeuzes

Om dit te bereiken (schema V2.3, afgebeeld in **figuur 1**), werden vier opeenvolgende versies gemaakt, met vier schema's en vier verschillende printen, waarvan de laatste versie is afgebeeld in **figuur 2**. Alle details zijn te vinden in het artikel dat is gepubliceerd op Elektor Labs [1].



▲ *Figuur 1. Het schema van de notebook-powerbank.*

De frequentie wordt ingesteld op 100 kHz door de 220k Ω -weerstand R20. De INT VCC-pin moet worden verbonden met een keramische condensator van 4,7 μ F om de interne spanning te stabiliseren. Deze condensator moet zo dicht mogelijk bij het IC worden gemonteerd. Voor pin ITH volgt u gewoon de suggesties uit het 'Typical Application'-schema in de LTC1871-datasheet [3]. De pin RUN heeft een AAN/UIT-functie. We zien hier twee features:

- de beide weerstanden R4/R5 vormen een scheidingsnetwerk, waarvan de uitgang naar de RUN-pin de DC/DC-conversie stopt als de accuspanning onder een bepaalde waarde komt. De drempelwaarde is hier 1,248 V. De hier gekozen waarden schakelen de DC/DC-omzetter uit als de accuspanning onder 5,3 V komt. De spanning over R5 wordt gefilterd door een keramische condensator van 1 μ F, om te voorkomen dat spanningsdipjes de omzetter uitschakelen;
- wanneer een externe voeding wordt aangesloten, wordt zijn spanning aangelegd op trimmer R22, die werkt als een instelbare spanningsdeler. De uitgang van deze trimmer levert een voorspanning op de basis van Q2, die op zijn beurt de RUN-ingang van U1 naar een lage toestand forceert, waardoor hij gedeactiveerd wordt. In deze situatie komt de +VPC-spanning van D2.

Hiervoor is een eenvoudige afregeling nodig. Aangezien de nominale ingangsspanning kan verschillen tussen verschillende PC-voedingen, moet de uitschakeldrempel van U1 worden aangepast met R22. Als de externe voeding is aangesloten op het apparaat, moet R22 worden verdraaid totdat de DC/DC-LED (D8) uitgaat. De moeilijkste taak in dit ontwerp was het vinden van de juiste MOSFET Q1 en spoel L1. Ik heb verschillende spoelen geprobeerd en uiteindelijk een 4,7 μ H-exemplaar van Coilcraft [4] gebruikt. Voor de MOSFET heb ik ook verschillende tests gedaan. Ik moest een schakelaar vinden die geschikt was voor minstens 30 V en 30 A met de laagst mogelijke $R_{DS\text{ON}}$. De uiteindelijke keuze viel op een IPD031N03L van Infineon Technologies (30 V, 90 A), met een $R_{DS\text{ON}} = 2,6 \text{ m}\Omega$ (bij $V_{GS} = 5 \text{ V}$). De hier gebruikte diode D4 is een SBR20M150 (20 A, 150 V) van Diodes Incorporated. Omdat Q1 en D4 even 'dik' zijn, kunnen ze hetzelfde koellichaam delen. Na de schakeldiode stabiliseren en filteren twee keramische condensatoren (C8 en C14, respectievelijk 100 nF en 2 μ F) en een elektrolytisch exemplaar (C20, 220 μ F/25 V) de uitgangsspanning.

Acculader

Het IC dat in dit gedeelte wordt gebruikt is een LTC4002-8.4 (Analog Devices) in SO-behuizing. De LTC4002 is

leverbaar in twee versies: 4,2 V en 8,4 V. Let erop dat u voor dit project de 8,4V-versie bestelt.

De interessantste eigenschap van dit IC is het brede ingangsspanningsbereik van 9...22 V. Aangezien het de bedoeling is om de laadmodule te voeden met de standaard externe PC-voeding, is dit perfect. Het is een schakelend DC/DC druppellaad-IC.

De laadmodule wordt gevoed door de externe PC-voeding via D3, een SMD Schottky-gelijkrichtdiode SSB44 van Vishay (4 A, 40 V).

De laadstroom wordt begrensd door een shunt (R6, 100 mV/R6 [mA]). Hier hebben we gekozen voor een weerstand van 0,1 Ω die de laadstroom tot ongeveer 700 mA begrenst (mede afhankelijk van het verbruik van andere onderdelen). De keuze voor zo'n lage laadstroom heeft tot doel niet te veel stroom te onttrekken aan de standaardvoeding, die ook de PC moet voeden en anders overbelast zou kunnen raken. De stroom kan worden verlaagd door R6 aan te passen.

De spoel is een 15 μ H/1 A (nominaal) exemplaar, en die keuze was gebaseerd op enige berekeningen uit de datasheet. Voor MOSFET IC2 is de maximale spanning belangrijk; deze moet hoger zijn dan 20 V. Hier is gekozen voor een Si4435 van Vishay met een spanning van 30 V (2 A). De IRF9393 (van Infineon) kan ook worden gebruikt. D5 diode is een Schottky MBR330 (3 A, 30 V).

Op de accu's kan een NTC worden gemonteerd om te voorkomen dat ze worden opgeladen als ze te warm zijn. In dit ontwerp is het gebruik ervan verplicht. Op de print zijn er twee mogelijkheden voor de NTC, een SMT (op de achterkant, met een passende opening in de batterijhouder) of een through-hole exemplaar. LED D7 licht op als het laadproces is ingeschakeld.

Het is interessant om op te merken dat, wanneer het laadproces is beëindigd (detectie van lage stroom), een timer wordt geactiveerd en hernieuwd laden (indien nodig) pas 3 uur later mogelijk is, behalve natuurlijk wanneer de ingangsspanning wordt af- en daarna weer ingeschakeld.

Displaygedeelte

Het spannings- en stroomdisplay wordt aangestuurd door een 8-pins PIC12F1840-microcontroller van Microchip. Het wordt gevoed door een lineaire regelaar AP7381-33 (3,3 V, SOT23) met een breed ingangsspanningsbereik. Voor de stroom- en spanningsinformatie worden twee stroomsensor-IC's INA219 van Texas Instruments gebruikt. Deze hebben onafhankelijke hoogspanningsingangen (tot 30 V) aan de sensorzijde, terwijl de voedingsspanning desondanks niet hoger hoeft te zijn dan 3,3 V. De meetwaarden worden via een I²C-interface naar microcontroller U4 gestuurd.

Om storing door de spanningsval van de accu's tijdens gebruik te beperken, is de AP7381-33-regelaar via een diode D9 en een paar condensatoren verbonden met

VBAT. Dat moest zo omdat zonder deze condensatoren de 3,3 V nooit schoon genoeg zou zijn geweest voor de INA219 met als gevolg foutieve meetwaarden. Elk IC heeft ook een condensator van 1 μ F (C30, C23) vlakbij de ingangen IN+ en IN-.

In het schema zijn de shuntweerstand (R9 en R29) verbonden met de INA219 via een eventueel filter (zoals voorgesteld in de datasheet, zie [5]). Op de laatste print heb ik deze niet gebruikt en heb ik daarom R30/R31/R10/R11 vervangen door draadbruggen.

Er is een optionele drukknopfunctie toegevoegd, maar die wordt tot nu toe niet gebruikt. Ook is er een koppe-

ling gemaakt van de NTC naar een analoge ingang van de μ C om eventueel de temperatuur op het display te tonen. Maar deze functie is nog niet geïmplementeerd in de software.

De INA219-IC's en het OLED-display worden met I²C aangestuurd (connector J2). Dit display heeft 128x32 pixels (0,91"), zoals dit exemplaar van Smart Prototyping [6].

Programma

Voor de software (geschreven in MikroC en ook beschikbaar op de Elektor Labs-pagina bij dit artikel [1]) moest ik woekeren met de beperkte omvang van het flashgeheugen (4 kB). De I²C-communicatiefunctie werd herschreven en geoptimaliseerd om het geheugengebruik te reduceren. Het is een eenvoudige lus om de PC-spanning en VBAT-spanning te meten door VBUS en VSHUNT van beide INA219's uit te lezen. Ik heb geen gebruik gemaakt van de interne mogelijkheden van de INA219 voor automatische berekening van vermogen, stroom enzovoort.

De stroom- en spanningsuitlezingen worden alleen naar het OLED-display gestuurd als hun waarden zijn veranderd ten opzichte van de vorige doorloop van de programmalus. Voor het OLED-display moest een eenvoudige bibliotheek worden gebruikt, omdat de oorspronkelijke OLED-bibliotheek niet in de 4 kB van het flashgeheugen paste. De 12F1840-microcontroller is geprogrammeerd met behulp van het PICkit V3-tool en connector J3, waar deze programmer rechtstreeks op kan worden aangesloten.

Belangrijk (ik heb deze fout meerdere keren gemaakt): verhoog de waarde van C25 niet (deze moet 2,2 μ F of kleiner zijn). Met hogere waarden maakt de PICkit V3-programmer niet altijd goed verbinding met de microcontroller!

Ventilatie

Tijdens alle tests met een uitgangsstroom van 3 A, waarvoor meer dan 10 A van de accu's nodig is, wordt erg veel warmte gegenereerd door de MOSFET Q1, D4, L1 en de accu's. In de behuizing moest een ventilator worden aangebracht om alle warmte van al deze componenten af te voeren. De ventilator is een exemplaar van 40x40 mm (5 V) en moet onder de volgende omstandigheden worden ingeschakeld:

- de temperatuur is hoog, dat wil zeggen hoger dan 50 °C;
- de accuspanning is hoger dan 5 V (2,5 V per cel).

Daarvoor werd een standaard 5V-LDO (SOT23) gebruikt, een LP2992 van Texas Instruments. Deze kan 250 mA leveren bij een geringe spanningsval en heeft een ON/OFF-pin om de uitgang te regelen (1 = ON, 0 = OFF). Voor de beide hierboven genoemde situaties worden drie 2N2222 NPN-transistoren gebruikt.



Onderdelenlijst

Weerstanden:

R1,R3,R5 = 22 k
R2 = niet gemonteerd
R4 = 75 k
R6 = 0,1 Ω
R7 = 2k2
R8,R19 = 10 k NTC
R9,R29 = 0,01 Ω
R10,R11,R30,R31 = 10 Ω *
R12 = niet gemonteerd
R13,R24,R25,R26 = 10 k
R14,R15 = 2k7
R16 = 33 k
R17 = 4k7
R18 = 100 k meerslagen-instelpotmeter
R20 = 220 k
R21 = 1 k
R22 = 10 k meerslagen-instelpotmeter
R23 = 5k6
R27 = 1k2
R28 = niet gemonteerd

Condensatoren:

C1 = 6n8
C2 = 47 p
C3,C6,C14, = 22 μ /25 V
C4, C26 = 47 μ /25 V
C5 = 4,7 μ /25 V
C7 = 100 μ /25 V
C8...C11 = 100 n
C12,C20 = 220 μ /25 V elco
C13 = 470 n
C15,C17 = 470 μ /25 V
C18,C23,C30 = 1 μ /25 V
C19 = niet gemonteerd
C25 = 2 μ 2
C16,C21,C22,C24,C27,C31 = 100 n
C28, 29 = niet gemonteerd

Spoulen:

L1 = 4 μ H7, zie [4]
L2 = niet gemonteerd
L3 = niet gemonteerd
L4 = 15 μ H, 1 A nominaal

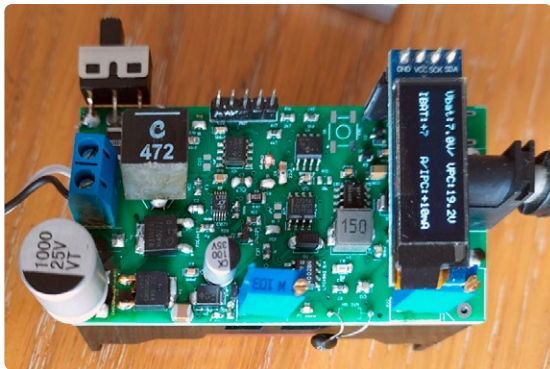
Halfgeleiders:

U1 = LTC1871
U2 = AP7381-33
U3 = LTC4002
U4 = PIC12F1840
IC1,IC4 = INA219
IC2 = SI4435 of IRF9393
IC3 = LP2992
Q1 = IPD031N03L
Q2...Q6 = 2N2222
Q5 = niet gemonteerd
D1, D2, D3 = SSB44 Schottky-diode
D4 = SBR20M150
D5 = MBR330 Schottky-diode
D6 = LED rood (PC-voeding)
D7 = LED rood (laadindicatie)
D8 = LED rood
(DC/DC-omzetter indicatie)
D9 = 1N4001
D10 = zenerdiode 12 V/0,5 W

Diversen:

2 x 18650 3,7 V-cel, LG type LGABHG21865
1 x 2-polige printkroonsteen (PC-uitgang)
1 x voedingsconnector, female, voor printmontage, of
1 x 2-polige printkroonsteen (AlimPC)
2 x koellichaam (zie tekst)
1 x 0,91" OLED-display, zie [6].
1 x ventilator, 40x40 mm, 5 VDC

* zie tekst



▲ *Figuur 4. De print met het display dat de momentane accu- en uitgangsspanning toont.*

- > Een 2N2222-transistor (Q6) met een weerstand (verbonden met de gestabiliseerde 3,3V-voeding) en een 10kΩ-NTC schakelt als de temperatuur hoog wordt. Wanneer de temperatuur stijgt, neemt de waarde van de NTC af en op een gegeven moment zal de transistor uitschakelen. Hierdoor wordt de ON/OFF-pin ingeschakeld (hoog) en wordt de 5V-ventilator van spanning voorzien.
- > Twee stuks 2N2222-transistoren om VBAT (accuspanning) te bewaken. Als deze lager is dan 5 V, wordt de eerste transistor (Q4) uitgeschakeld, waardoor de tweede transistor (Q3) verzadigd raakt en de ON/OFF-pin laag wordt, waardoor de ventilator stopt.

Keuze van de accu

Voor de MOSFET en de spoel is de keuze van de accu cruciaal. Deze moeten minstens 20 A kunnen leveren. Ik heb een exemplaar van LG gevonden (LGABHG21865) die tot 30 A zou kunnen leveren.

Een probleem hierbij is de houder. Een standaard-houder wordt snel heet bij stromen van 10...20 A. Waar mogelijk is het beter om de 18650-cellen rechtstreeks op de print te solderen.

Uiteindelijke uitvoering

Het ontwerp van de dubbelzijdige print werd gerealiseerd met Diptrace-software. Dit was een beetje lastig vanwege de hoge stroom die nodig is voor de DC/DC boost-converter. Hiervoor zijn brede sporen en grote massavlakken op de onderzijde voorzien. **Figuur 4** toont de print inclusief het OLED-display dat de actuele waarden weergeeft.

De INA219 heeft een schone 3,3V-voeding nodig, plus een aantal 100n-ontkoppelcondensatoren in de buurt; bij het ontwerp van de print is daar rekening mee gehouden. De afmetingen van de print komen overeen met de maten



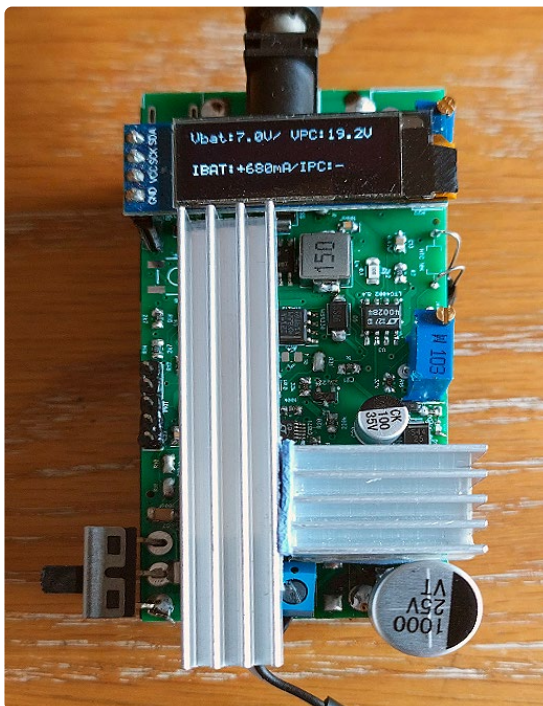
▲ *Figuur 5. De twee 18650-LiPo's in de batterijhouder. Vanwege de hoge gemiddelde stroomwaarden is het raadzaam om de printversie van deze cellen (met soldeerlippen) te gebruiken en ze rechtstreeks op de print te solderen.*

van een houder voor twee 18650-cellen, zie **figuur 5**. Zoals al opgemerkt, is het echter beter om indien mogelijk geen standaard-houder met veercontacten te gebruiken, maar accu's met aansluitlippen die rechtstreeks op de print kunnen worden gesoldeerd.

Warmtedissipatie

Tijdens het DC/DC boost-proces wordt een grote hoeveelheid warmte gegenereerd door D4, Q1 en L1. In dit ontwerp worden twee koellichamen gebruikt: één voor Q1 en D4 en één voor L1. Ze zijn op de componenten bevestigd met dubbelzijdige warmtegeleidende plakband.

Figuur 6 toont de uiteindelijke versie van het prototype met geïnstalleerde koellichamen.



◀ *Figuur 6. De volgebouwde print van het prototype, met de koellichamen op hun plaats.*



Over de auteur

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



► *Figuur 7. De kleine ventilator heeft genoeg ruimte in de behuizing, die daarvoor op maat is gemaakt.*

AAN/UIT-schakelaar

Om de batterijen op de module aan te sluiten, is een schakelaar voor meer dan 10 A gebruikt. Deze staat niet vermeld in het schema, maar is rechtstreeks op de printplaat gemonteerd. Hij moet worden aangesloten tussen VBATC en de '+' van de accu's.

De speciale behuizing is met opzet 3D-geprint. Hij is iets breder dan de batterijhouder vanwege de dikte van de ventilator, zie **figuur 7**. Het voltooide en werkende prototype is in zijn op maat gemaakte behuizing te zien in **figuur 8**. ◀

230611-03



► *Afbeelding 8. Het voltooide prototype aan het werk, in zijn fraaie 3D-geprinte behuizing.*

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

- **Steffen Wolf, Ralf Regenhold, *Abc of Power Modules* (Würth, 2015, E-book)**
www.elektor.nl/19805
- **AE970D Soldering Station (80 W) incl. extra Soldering Tip**
www.elektor.nl/20731



WEBLINKS

- [1] Elektor Labs-pagina bij dit project: <https://tinyurl.com/yaxu9bk5>
- [2] Webpagina Analog Devices LTC4002: <https://www.analog.com/en/products/ltc4002.html>
- [3] Datasheet Analog Devices LTC1871: <https://tinyurl.com/3bzdjd9p>
- [4] Datasheet Coilcraft-spoel: <https://tinyurl.com/y7w2jkcu>
- [5] Datasheet Texas Instruments INA219: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf>
- [6] 0,91" OLED-display bij Smart Prototyping: <https://tinyurl.com/ycktr2mc>

Medische robots

het overwinnen van technische en regelgevende barrières



Het gebruik en de diversiteit van medische robots nemen toe, wat betekent dat oplossingen zoals hierboven afgebeeld binnenkort werkelijkheid kunnen worden (bron: phonlamaipphoto/stock.adobe.com).

Mark Patrick (Mouser Electronics)

Robots ontwerpen is nooit gemakkelijk, maar medische robots gaan vergezeld van een aantal unieke regelgevende en technische uitdagingen die ingenieurs moeten overwinnen.

De afgelopen twintig jaar hebben medische robots zich ontwikkeld van een concept in science fiction tot een wezenlijk onderdeel van de moderne gezondheidszorg. De komst van geavanceerde robots op de markt heeft geleid tot verbeteringen bij talloze ingewikkelde taken, variërend van operaties en laboratoriumwerk tot farmaceutische automatisering en patiëntrevalidatie. Een rapport van het Private Healthcare Information Network (PHIN) toonde een opmerkelijke stijging van 524 procent in robotgeassisteerde operaties in het Verenigd Koninkrijk van 2016 tot 2023, terwijl in het eerste kwartaal van 2024 er in totaal 22.700 robotgeassisteerde medische handelingen werden uitgevoerd, wat de snelle uitbreiding van robots in de gezondheidszorg illustreert [1].

Ondanks deze indrukwekkende groei is de huidige markt echter nog relatief onvolwassen. Onafgebroken voortgang op het gebied van perceptie, vermogen en besturingselektronica, evenals kunstmatige intelligentie (AI), zou de motor kunnen zijn voor een geheel nieuwe golf van medische robotontwikkelingen, waaronder verbeteringen op het gebied van chirurgische robots en exoskeletten.

Een medische robot op de markt brengen is niet gemakkelijk. Alle kansrijke ontwerpen moeten het hoogste niveau in precisie en veiligheid bieden en tegelijkertijd voldoen

aan een complex netwerk van technische voorschriften. In dit artikel gaan we na hoe ontwerpingenieurs de unieke regelgevende en technische barrières kunnen slechten om robots te maken die de gezondheidszorg gemakkelijk kan gebruiken.

Door het complexe regelgevingslandschap navigeren

Voor ingenieurs die medische robots willen ontwikkelen voor gebruik binnen de Europese Unie (EU) en het Verenigd Koninkrijk (VK), vormen diverse belangrijke technische voorschriften een kader om de kwaliteit te waarborgen en patiënten te beschermen tegen mogelijk schadelijke apparaten.

De EU-verordening voor medische hulpmiddelen (MDR) [2], die op 26 mei 2021 in werking is getreden, regelt de productie en distributie van medische hulpmiddelen

in de Europese Economische Ruimte (EER). Zij omvat een certificerings- en een risico-gebaseerd systeem voor het classificeren van medische hulpmiddelen waaraan fabrikanten moeten voldoen om hun producten legaal in de EU te mogen verkopen.

Artikel 51 van de MDR deelt hulpmiddelen in de klassen I, IIa, IIb en III in op basis van factoren zoals het beoogde doel, de duur van de interactie met de patiënt en de inherente risico's van het gebruik [3]. Hulpmiddelen van klasse I vertegenwoordigen het laagste risico en omvatten eenvoudige hulpmiddelen zoals verband, terwijl hulpmiddelen van klasse III hulpmiddelen zijn met een aanzienlijke impact op het menselijk lichaam, zoals hartkleppen en chirurgische robots (figuur 1).

Ontwikkelingsteams die beginnen aan een medisch roboticaproject kunnen de MDR-classificatiegids raadplegen om de juiste klasse voor hun robot te bepalen. Deze gids vormt een projectkader zodat het juiste niveau van ontwikkeling en klinische tests wordt uitgevoerd voordat de oplossing wordt gelanceerd.

Figuur 1. Chirurgische robots worden snel een belangrijk onderdeel van moderne medische instellingen (bron: MasterVideo/stock.adobe.com).



Aanvullende voorschriften en normen

Voor medische robots is de EU MDR – of de gelijkwaardige regelgeving in het VK (UK MDR [4]) – slechts een van de vele regelgevingen waaraan moet worden voldaan. Robots die bedoeld zijn voor in-vitrodiagnostiek moeten ook voldoen aan de regelgeving voor in-vitrodiagnostiek (IVDR) en er zijn talloze IEC- en ISO-normen die cruciaal zijn voor ingenieurs die veilige medische robots willen ontwikkelen, waaronder:

- **IEC 80601-2-77:2019:** deze norm legt essentiële veiligheids- en prestatievereisten vast voor robotgeassisteerde chirurgische apparatuur (RASE), zodat systemen betrouwbaar en elektrisch veilig zijn in chirurgische omgevingen waar veel op het spel staat.
- **IEC 80601-2-78:2019:** voor revalidatie-robots, zoals exoskeletten, bepaalt deze norm de eisen voor hulpmiddelen die direct samenwerken met patiënten in een therapeutische omgeving, waarbij de nadruk ligt op operationele veiligheid en comfort voor de patiënt.
- **IEC TR 60601-4-1:2017:** deze technische gids over risicobeheer voor medische systemen kan ingenieurs helpen bij het vaststellen en aanpakken van potentiële risico's in robotsystemen, teneinde de veiligheid van patiënten en gebruikers te verbeteren.
- **ISO 14971:2019:** deze norm biedt een gestructureerde aanpak voor het risicobeheer in medisch ontwerp, waardoor ingenieurs gevaren in een vroeg stadium kunnen identificeren en minimaliseren, wat essentieel is voor naleving en patiëntveiligheid.
- **IEC 60601-serie:** deze uitgebreide serie bevat normen voor elektrische veiligheid, elektromagnetische compatibiliteit en prestaties, die van fundamenteel belang zijn voor een betrouwbare werking van medische robots in klinische omgevingen.

Hoewel robots niet expliciet verplicht zijn om aan IEC- en ISO-normen te voldoen, kunnen deze normen essentiële hulpmiddelen zijn voor ontwikkelingsteams om best practices te bevorderen en te garanderen dat robots geschikt zijn voor het beoogde gebruik.

Strategie voor het werken volgens normen

Voor ingenieurs die conforme, veilige en effectieve medische robots ontwikkelen, is het van cruciaal belang om de regelgeving en normen voor medische hulpmiddelen te kennen. Hoewel de exacte implicaties van elke norm en voorschrift variëren, kunnen verschillende werkstrategieën helpen om succes te garanderen:

- **Normen vroegtijdig integreren:** door van toepassing zijnde normen vanaf de start van het ontwerpproces op te nemen, kunnen dure herontwerpen voorkomen worden en ervoor zorgen dat uw ontwerp aan de wettelijke vereisten blijft voldoen.
- **Samenwerken:** samenwerken met belangrijke marktpartijen en regelgevings- en klinische experts kan het eenvoudiger maken om door het complexe regelgevingslandschap te navigeren, mogelijke nalevingsproblemen eerder te herkennen en goedkeuringprocedures te verfijnen.
- **Op de hoogte blijven van de laatste ontwikkelingen:** normen en voorschriften ontwikkelen zich, waardoor vaak nieuwe nalevingseisen worden geïntroduceerd. Door op de hoogte te blijven van deze wijzigingen kunt u anticiperen op aanpassingen in uw ontwerp en uw productontwikkeling afstemmen op de nieuwste eisen.
- **Gebruikersgericht ontwerp:** stel altijd de eindgebruiker centraal, dat betreft zowel patiënten als zorgverleners. Een robotontwerp dat de bruikbaarheid, veiligheid en patiëntenzorg verbetert, helpt niet alleen bij de naleving, maar verbetert ook de marktacceptatie en de praktische waarde van het hulpmiddel.
- **Documentatie:** zorgvuldige documentatie is essentieel. Documenteer het ontwerpproces, de risicobeoordelingen, de testresultaten en alle wijzigingen. Duidelijke en uitgebreide documentatie toont naleving aan en is vaak vereist voor het indienen van reglementaire toelatingen.

Door deze strategieën toe te passen, kunnen beheerders deze normen en belangrijke voorschriften op natuurlijke wijze zoals bedoeld in het ontwikkelingsproces verwer-

ken, waardoor ontwikkelingsteams begeleid worden in plaats van technische barrières voor ze op te werpen.

Ontwerpen opschalen om aan de wereldwijde vraag te voldoen

Robots maken voor medische omgevingen is per definitie ingewikkeld. Ingenieurs moeten prioriteit geven aan veiligheid en er tegelijkertijd voor zorgen dat ontwerpen kunnen worden geschaald en geprijsd om te voldoen aan de budgetbeperkingen van medische instellingen.

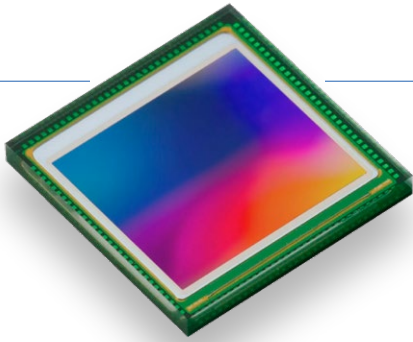
Robots zijn van oorsprong ontwikkeld en geproduceerd in kleine aantallen in laboratoria, vaak met behulp van hoogopgeleide handarbeid en op maat gemaakte hardware. Maar naarmate de productie toeneemt om aan de groeiende vraag te voldoen, worden assemblagesnelheid, kosten en productieconsistentie kritische factoren. Dat maakt de nauwkeurige assemblage van systemen zoals ingewikkelde mechanische verbindingen met strikte toleranties tot een ongelofelijke uitdaging.

Vroege robotprototypes maken bijvoorbeeld vaak gebruik van componenten zoals optische encoders met hoge resolutie, die weliswaar ongelooflijk nauwkeurig zijn, maar ook duur en zeer krappe assemblagetoleranties kennen. Anderzijds zullen in veel eindontwerpen encoders met een lagere resolutie volstaan. Dit betekent dat een ontwerper een goedkopere Hall-effect-encoder kan gebruiken, die ook minder strenge assemblagetoleranties kent.

Voor ingenieurs die medische robots ontwerpen is het van cruciaal belang om een balans te vinden tussen veiligheid, prestaties en schaalbaarheid als oplossingen in de markt moeten worden opgenomen. Sluiproutes op het gebied van veiligheid en prestaties kunnen catastrofale gevolgen hebben, terwijl onnodige prestatieverhogingen de kosten kunnen opdrijven en productieschema's kunnen vertragen.

Componenten selecteren voor een betrouwbare en nauwkeurige werking

De complexiteit van interacties tussen medische robots en mensen in taken als chirurgische procedures of ondersteunende exoskeletten vereist de hoogste niveaus in bewegingsbetrouwbaarheid, nauwkeurigheid en real-time reactiesnelheid. Om daaraan te kunnen voldoen,



Figuur 2. De Mira220 van ams OSRAM biedt hoge prestaties en een laag energieverbruik (bron: Mouser Electronics).

hebben ingenieurs een groot aantal essentiële componenten nodig, waaronder sensoren, motoraandrijvingen, encoders en intelligente besturingssystemen.

Perceptie en feedback

Om de precieze bewegingen van medische robots in vaak complexe omgevingen te kunnen garanderen, zijn zeer nauwkeurige perceptietechnologieën nodig. Mouser Electronics [5] biedt een breed scala aan sensoroplossingen die ontworpen zijn om de nieuwste medische robots te ondersteunen, variërend van chirurgische en diagnostische systemen tot revalidatieapparaten en oplossingen voor patiëntbewaking. Sensoren zoals de Mira220 1/2.7 2.2 MP Global Shutter-beeldsensoren van ams OSRAM [6] (**figuur 2**) voldoen aan de eisen van moderne medische robotica doordat ze een ideale balans bieden tussen prestaties en kosten. In tegenstelling tot rolling shutter-sensoren die beelden rij voor rij vastleggen, legt de global shutter het volledige beeld in één keer vast. Dat verbetert de precisie van AI-ondersteunde machinevisie-operaties door de continue zichtbaarheid van de volledige actuele scène te garanderen. In oplossingen zoals medische servicerobots die door gangen in ziekenhuizen moeten navigeren, zorgt de global shutter van de Mira220-sensoren in combinatie met de



Figuur 3. Het ontwerp van Broadcom's AEAT-901x-S06 vermindert assemblagefouten en zorgt voor nauwkeurige bewegingsfeedback (bron: Mouser Electronics).

maximale beeldsnelheid van 90 fps ervoor dat de besturingselektronica de omgeving nauwkeurig kan waarnemen.

Daarnaast maken de Mira220-sensoren gebruik van de MIPI CSI-2[®]-interface voor eenvoudige interactie met microprocessor-eenheden (MPU's) en field-programmable gate arrays (FPGAs). De registers op de chip zijn toegankelijk via de standaard I2C-interface voor eenvoudige configuratie, waardoor de integratie minder tijd kost.

Motordriversn en besturingssystemen

Perceptie is slechts één element voor een veilige en nauwkeurige medische robot. Alle bewegingen moeten ook soepel en gecontroleerd zijn. Dat vereist nauwkeurige motoraandrijvingen en besturingselektronica, evenals snelle interne feedbacksystemen.

Incrementele encoders leveren de bewegingsfeedback in de ingewikkelde mechanische gewrichten van een robot. In het verleden werd deze rol vervuld door zeer nauwkeurige optische sensoren, maar nu winnen goedkopere en eenvoudiger te monteren magnetische sensoren aan populariteit in robotica-toepassingen. De AEAT-901x-S06 Absolute Magnetic Kit Encoders van Broadcom [7] (**figuur 3**) zijn zo'n voorbeeld dat op maat gemaakt is voor robotica-toepassingen. De geïntegreerde

encoderbehuizing stroomlijnt de integratie en minimaliseert montagefouten, wat tijd en kosten bespaart.

Deze hoogwaardige apparaten kunnen nauwkeurig de absolute hoekpositie bepalen en bieden resoluties tot 18 bit, waardoor ze prestaties bieden die vergelijkbaar zijn met optische encoders. De olie- en stofbestendigheid van het ontwerp speelt een cruciale rol om de betrouwbaarheid te kunnen garanderen, waardoor de levensduur wordt verlengd.

Conclusie

Naarmate medische robots zich verder ontwikkelen, hebben ze de potentie om de gezondheidszorg te veranderen door verbeterde precisie en geautomatiseerde oplossingen. Om een robot succesvol op de markt te brengen, moeten ingenieurs echter zowel het hoofd bieden aan uitdagingen op het gebied van regelgeving als aan hoge technische normen, terwijl ze tegelijkertijd een evenwicht moeten vinden tussen kosten en schaalbaarheid.

Door zich te concentreren op precisie, realtime feedback en een ontwerp dat voldoet aan de veiligheidsvoorschriften, en tegelijkertijd de nieuwste geavanceerde perceptie- en besturingstechnologieën toe te passen, kunnen ontwikkelaars de integratie van robots in medische toepassingen aanzienlijk versnellen **◀** 240688-03

Over de auteur

Als Director of Technical Content voor EMEA bij Mouser Electronics 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 engineers te ondersteunen, te informeren en te inspireren. Voordat Mark leiding gaf aan Technical Content, maakte hij deel uit van Mouser's EMEA Supplier Marketing-team en speelde hij een cruciale rol bij het opbouwen en ontwikkelen van relaties met belangrijke productiepartners. Marks eerdere ervaring omvat praktische technische functies, technische ondersteuning, technische verkoop van halfgeleiders en verschillende marketingfuncties. Mark is een 'hands-on' engineer in hart en nieren en heeft een eerstegraads Honours Degree in Electronics Engineering van Coventry University. Hij heeft een passie voor vintage synthesizers en Britse motorfietsen die hij zelf onderhoudt en repareert.

WEBLINKS

- [1] Phin, "New report shows record use of robot-assisted surgery technology in the NHS and private sector," Oct 2024: <https://www.phin.org.uk/news/record-use-of-robot-assisted-surgery-technology>
- [2] EU-verordening voor medische hulpmiddelen (MDR): <https://eumdr.com/>
- [3] Medical Device Coordination Group, "MDCG 2021-24," Oct 2021: https://health.ec.europa.eu/system/files/2021-10/mdcg_2021-24_en_0.pdf
- [4] Regulating Medical Devices in the UK: <https://www.gov.uk/guidance/regulating-medical-devices-in-the-uk>
- [5] Mouser Electronics: <https://eu.mouser.com/>
- [6] Mira220 Shutter-beeldsensoren van ams OSRAM: <https://eu.mouser.com/new/ams-osram/ams-osram-mira220-sensors/>
- [7] AEAT-901x-S06 Absolute Magnetic Kit Encoders van Broadcom: <https://eu.mouser.com/new/broadcom/broadcom-aeat-901x-s06-encoders/>

Vorstbescherming voor fruitbomen

met temperatuurlogger



Thomas Dausner (Duitsland)

Door de klimaatverandering is de gemiddelde temperatuur op aarde gestegen, waardoor fruitbomen en andere gewassen elk jaar vroeger bloeien. Onder deze omstandigheden kan nachtvorst leiden tot het verlies van de volledige oogst. Het systeem in dit project lost dit probleem op door middel een techniek die de 'kristallisatiewarmte' gebruikt. En dat werkt!

Elke lente geniet ik van de bloeiende fruitbomen in mijn tuin. De eerste die bloeit is een abrikoos – zo vroeg (begin maart) dat de maart- en aprilvorst van de afgelopen jaren de hele oogst om zeep hielp. Fruittelers maken gebruik van de kristallisatiewarmte wanneer water onder 4 °C bevriest. Dus besloot ik om mijn abrikozenboom te beregenen om vorstschade te voorkomen. Commerciële vorstbeveiligingssystemen zijn vrij duur. Niet zozeer het beregeningsgedeelte, maar de besturing. Daarom besloot ik mijn eigen vorstbeveiligingssysteem te bouwen.

In het kort

Het vorstbeveiligingssysteem (zie **figuur 1**) bestaat uit:

- › de controller (middenonder), die een temperatuur van 22,0 °C toont;
- › de voeding (linksonder);

- › een temperatuursensor met 15 meter coaxkabel (rechts);
- › een irrigatie-magneetventiel [1] om de bewatering in en uit te schakelen (linksboven);
- › een rondsproeier [2] (aangesloten op de uitgang van het magneetventiel) en een waterslang van enkele meters (bovenop de coaxkabel van de temperatuursensor);
- › een USB/RS232-adapter [3] in krimpous (rechtsonder).

Eigenschappen

Als ik aan een project begin, maak ik meestal eerst een lijst met de gewenste eigenschappen:

- › de temperatuur voor in- en uitschakelen van de beregening moeten instelbaar zijn;
- › datum en tijd van de beregening moeten worden gelogd;



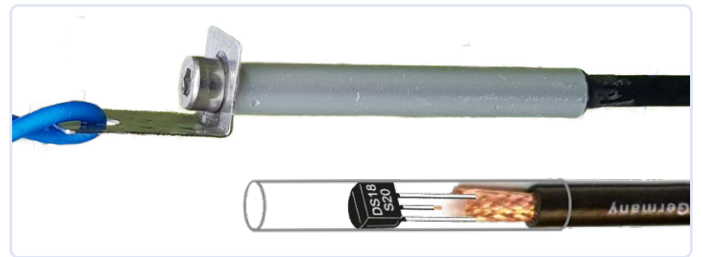
Figuur 1. Alle componenten van het vorstbeveiligingssysteem.

- datum en tijd moeten instelbaar zijn;
- de gelogde beregeningsgegevens moeten worden uitgevoerd via een seriële interface;
- de berekening moet handmatig kunnen worden in- en uitgeschakeld om de sproeier bij mijn abrikozenboom goed uit te richten;
- de beregeningsstatus moet worden aangegeven door een LED;
- de hardware moet met standaardonderdelen die ik doorgaans op voorraad heb, worden opgebouwd.

Gebruiksscenario

Op zoek naar een geschikte temperatuursensor besloot ik een DS18S20 1-draads digitale precisie-temperatuursensor van Analog Devices [4] te gebruiken in plaats van een analoge oplossing. De DS18S20 is een temperatuurgestabiliseerde sensor met 9-bits resolutie in het bereik van -10 °C tot $+85\text{ °C}$ met een nauwkeurigheid van $\pm 0,5\text{ °C}$. De aansluiting is eenvoudig en er is C-software voor beschikbaar.

Mijn abrikozenboom staat op ongeveer 15 m van mijn tuinhuisje, dus moest ik mijn temperatuursensor zo configureren dat een coaxkabel van 15 m gebruikt kon worden, aangezien alle normaal verkrijgbare DS18S20-temperatuursensoren een maximale kabellengte van 10 m specificeren. Coaxkabels van 15 m met aangegoten BNC-connectoren zijn gemakkelijk verkrijgbaar. Daarom heb ik gekozen voor een tweedraadsverbinding voor de temperatuursensor (voor de 'parasitaire voeding' zijn slechts twee aansluitingen nodig). De sensor is ingegoten in een aluminium buisje met een diameter van 6 mm en is dus waterdicht (**figuur 2**). De temperatuursensor bevindt zich ongeveer 3 m boven de grond in het midden van mijn abrikozenboom. Na een nacht met ochtendtemperaturen beneden 3 °C lijkt het erop dat kristallisatiewarmte zijn zegenrijke werk doet (zie **figuur 3**)! We zullen het formaat van de gelogde gegevens verderop bespreken.



Figuur 2. De ingegoten temperatuursensor.

Aan het eind van de winter komt de temperatuur waar ik woon niet gedurende langere tijd meer dan een paar graden onder nul, dus het water in de slang zal niet bevriezen. De controller heeft ook geen 'milspec' onderdelen nodig, want hij staat beschut in mijn tuinhuisje.

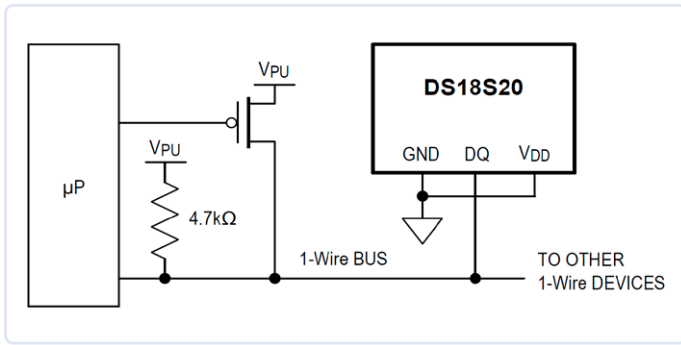
Temperatuursensor

Ik heb genoeg discussies op het web gelezen over mogelijke kabellengtes voor DS18x20 temperatuursensoren. Ik ben het ermee eens dat het enerzijds een kwestie is van controllertiming en anderzijds een kwestie van reflectie in een lange kabel. In een blog over dit specifieke aspect [5] zegt de auteur het volgende:

"De DS18B20 werkt met langere kabels. Omdat het een eendraads component is, zijn er maar twee aansluitingen nodig. Een test met een kabel van 100 m was geen succes, maar op ongeveer 20 m werkt het nog goed genoeg. Soms krijg ik een foutieve meting van $-127,0\text{ °C}$, maar het lijkt erop dat dit met 3 m kabel net zo vaak gebeurt als met (meer dan) 20 m kabel."



Figuur 3. Kristallisatiewarmte werkt!

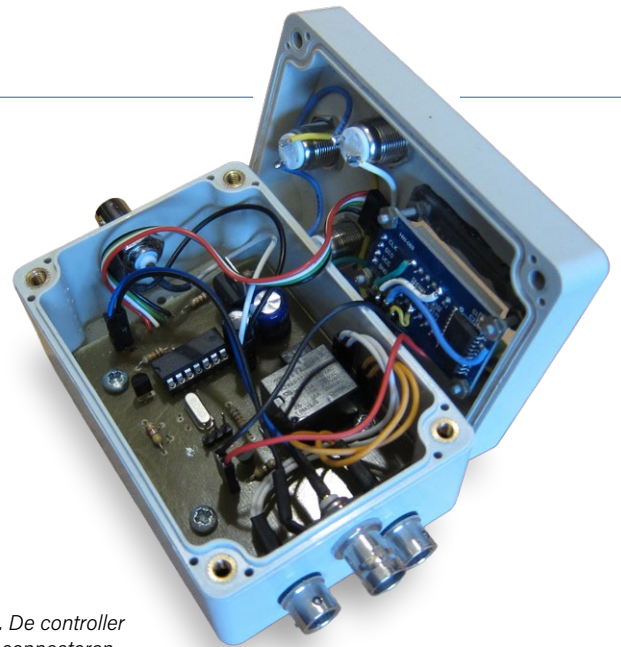


Figuur 4. De parasitaire voeding voor de DS18S20 tijdens een temperatuurconversie (bron: Analog Devices [4]).

Parasitaire voeding, een methode om het IC van stroom te voorzien – zelfs terwijl gegevens worden overgedragen – wordt uitgelegd in de paragraaf "Powering The DS18S20" in de datasheet [4] (zie ook het vereenvoudigde schema in **figuur 4**):

"Bij parasitaire voeding kunnen de 1-Wire-bus en CPP [de interne condensator van de sensor, zichtbaar in **figuur 5**] de DS18S20 van voldoende stroom voorzien voor de meeste bewerkingen zolang aan de gespecificeerde timing- en spanningsvereisten wordt voldaan... Wanneer de DS18S20 echter temperatuurconversies uitvoert of gegevens kopieert van het scratchpad-geheugen naar EEPROM, kan de bedrijfsstroom oplopen tot 1,5 mA. Deze stroom kan een onaantvaardbare spanningsval veroorzaken over de kleine 1-Wire pull up-weerstand en is ook meer dan door CPP kan worden geleverd. Om te garanderen dat de DS18S20 voldoende voedingsstroom heeft, is het noodzakelijk om een zwaardere pull up te gebruiken op de 1-Wire bus wanneer temperatuurconversies plaatsvinden of gegevens worden gekopieerd van het scratchpad naar EEPROM. Dit kan worden bereikt door de bus met een MOSFET rechtstreeks naar de voedingsrail te trekken, zoals getoond in **figuur 4**. De 1-draads bus moet binnen maximaal 10 µs nadat een commando Convert T [44h] of Copy Scratchpad [48h] is gegeven, worden omgeschakeld naar de zwaardere pullup en de bus moet hoog worden gehouden door de pullup tijdens de duur van de conversie (tCONV) of data-overdracht (tWR = 0 ms)."

En dus besloot ik, als elke echte engineer, het gewoon te proberen; ik bouwde een testopstelling op breadboard met mijn zelfgemaakte coaxkabel van 15 m. De parasitaire voeding van de sensor werkt, zoals je verderop in het schema zult zien. Om een lang verhaal kort te maken: bijna steeds werkte mijn testopstelling zoals verwacht, hoewel de



Figuur 6. De controller met alle connectoren.

temperatuursensor heel af en toe een onzinnige waarde leverde, zoals in het eerste citaat al vermeld. Dit wordt weerspiegeld in de software (zie het bestand `mode_watch.c` in de broncode):

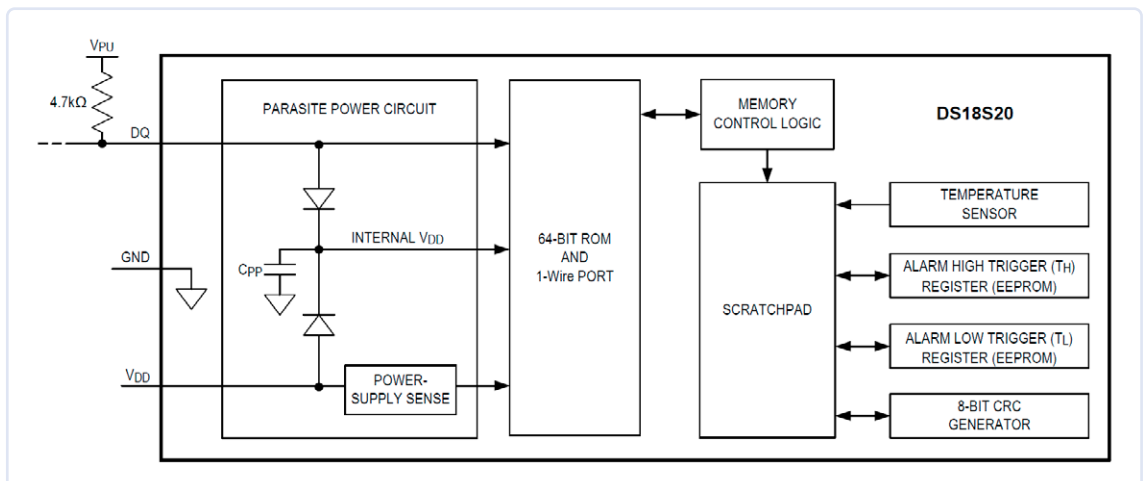
- de temperatuurconversie-cyclus begint met het voeden van de sensor door gedurende 200 ms 5 V op de datalijn te zetten;
- de temperatuurmeting begint;
- na een vertraging van 750 ms wordt de sensor uitgelezen;
- bij een onrealistische sensorwaarde (lager dan $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ of hoger dan $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$) wordt de cyclus herhaald.

Voeding en magneetspoel

De controller heeft een gelijkrichter, condensatoren en een spanningsregelaar aan boord en trekt slechts een paar mA, voornamelijk voor het display en de spoel van het magneetventiel. Dat betekent dat je elke AC- of DC-adapter kunt gebruiken, zolang de magneetspoel maar goed werkt. Mijn voeding is een oude laptop-voedingsadapter (16 V_{DC}/4,5 A). De spoel van het magneetventiel is een 24 V wisselstroomtype dat een betrouwbaar schakelgedrag vertoont bij 16 V_{DC}.

Controller

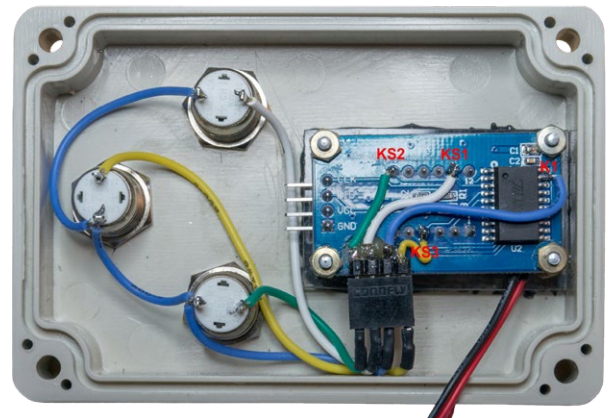
De controller is ondergebracht in een IP65-behuizing van 100×68×50 mm [6]. In het voltooide prototype (**figuur 6**) zijn de vier aansluitingen



Figuur 5. Blokschema van de DS18S20; C_{PP} wordt geladen via de DQ-buslijn wanneer geen data worden verzonden (bron: Analog Devices [4]).



Figuur 7. Vooraanzicht van de controller.



Figuur 9. De gemodificeerde TM1637.

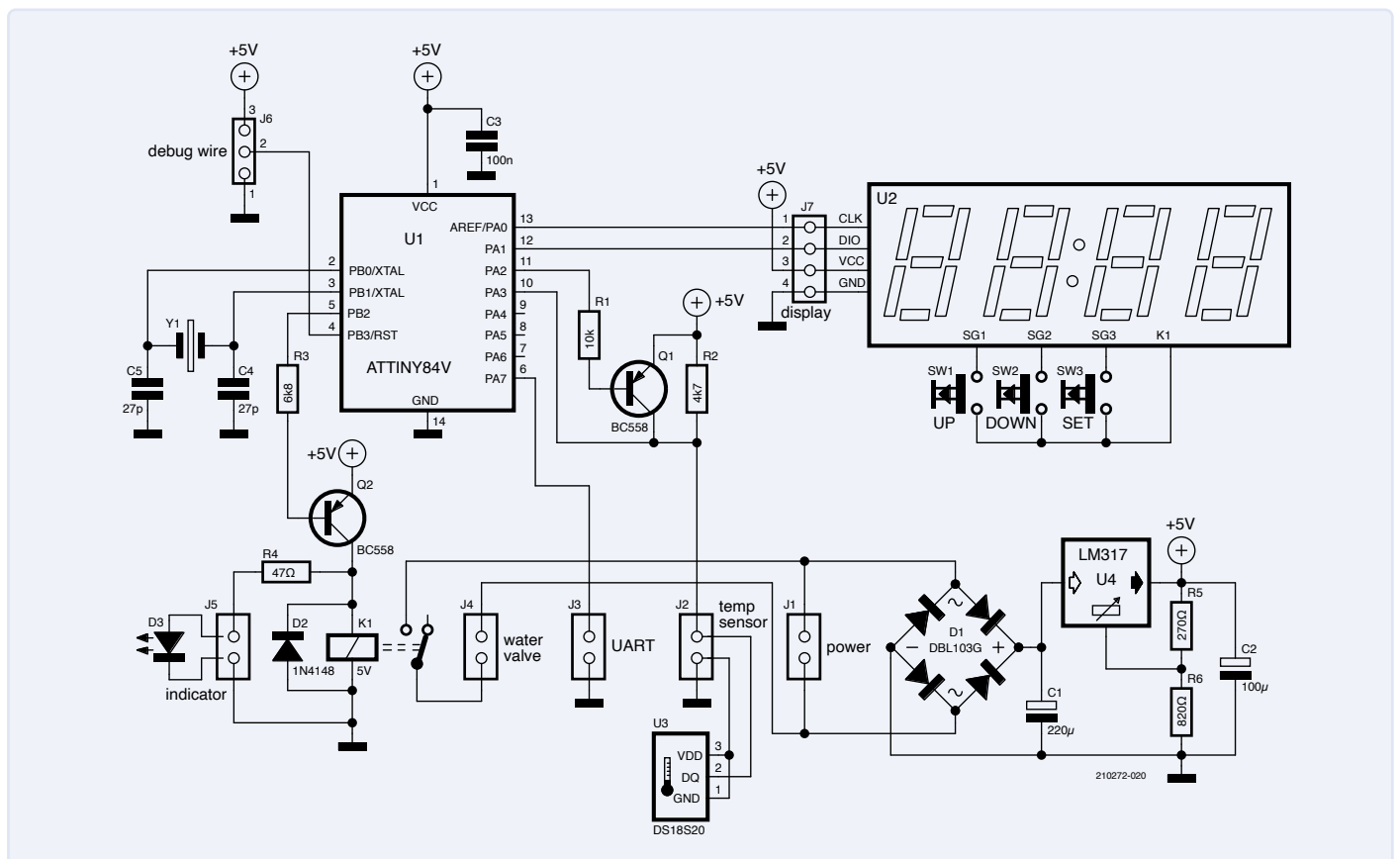
te zien, van links naar rechts: seriële uitgang aan de achterkant, en aan de voorzijde voeding, temperatuursensor en magneetspoel. De aansluitingen voor de seriële uitgang en de temperatuursensor zijn van het BNC-type. Voor de aansluitingen van de voeding (4-polig) en het magneetventiel (2-polig) worden connectoren met veervergrendeling gebruikt [7][8]. Het display is gemonteerd op 5 mm dik plexiglas, met epoxy verlijmd op de voorzijde van de behuizing. De indicatie-LED bevindt zich links van het 7-segment-display. De drukknoppen die op de foto zichtbaar zijn, vond ik tussen mijn elektromechanische reserve-onderdelen (figuur 7).

Het schema

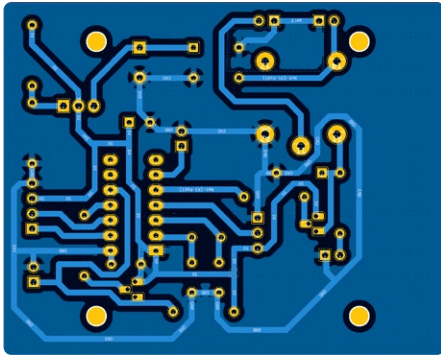
Figuur 8 toont het schema van het project. De hardware van de controller is eenvoudig: een Microchip ATtiny84 microcontroller [9], een viercijferig 7-segment display met een Titan Micro Electronics

TM1637 [10], een 5V-relais, een spanningsregelaar (STMicroelectronics LM317T), de externe DS18S20-temperatuursensor en nog een paar andere standaardcomponenten. De microcontroller is kristalgestuurd, omdat hij alle irrigatie-events logt met een tijdstempel. Een vorige versie van de vorstbewakingscontroller gebruikte de ingebouwde klok, die voor dit doel te onnauwkeurig bleek.

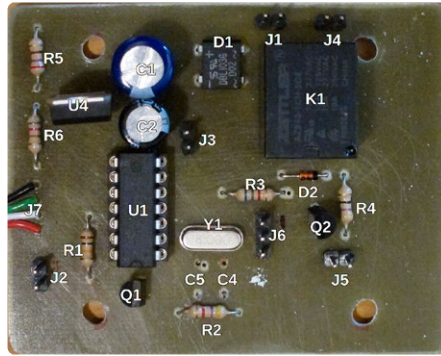
De DS18S20-temperatuursensor wordt tijdens temperatuurconversies parasitair gevoed door R1 en Q1, zoals aanbevolen in de datasheet. Tijdens de conversie geleidt Q1 en wordt de DS18S20 opgeladen. Tijdens communicatie wordt Q1 geblokkeerd en wordt de datalijn afgesloten door R2. Toen ik de TM1637-datasheet [11] bekeek, ontdekte ik dat deze controller tot 16 drukknoppen kan uitlezen. Vervolgens heb ik de TM1637-controller aangepast voor uitlezing van de drie drukknoppen SW1...SW3, zoals te zien in figuur 9. De drukknoppen zijn aangesloten op pinnen KS1, KS2, KS3 en K1 van de TM1637-controller.



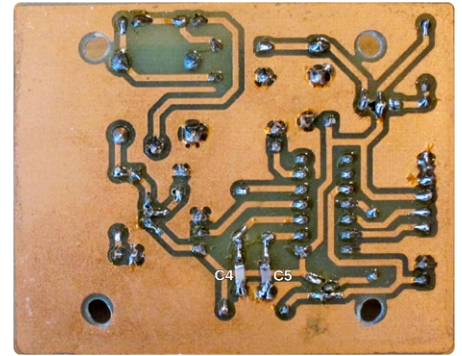
Figuur 8. Het schema van het project.



Figuur 10. De print zoals in KiCad ontworpen.



Figuur 11. Bovenaanzicht van de print.



Figuur 12. Onderzijde van de volgebouwde print, met extra condensatoren C4 en C5.

Print

De print-layout (figuur 10) is net als het schema ontworpen met KiCad [12]. De print wordt met uitsluitend through-hole componenten bestukt (figuur 11); in deze prototype-versie van de print zijn enkele footprints vergeten: condensator C3 (100 nF) is ondergebracht in het voetje voor U1, terwijl condensatoren C4 en C5 (27 nF, SMD) rechtstreeks aan de koperzijde van de print zijn gesoldeerd, zoals te zien in figuur 12.

Software

Specificaties

Voordat ik software ga ontwikkelen, maak ik eerst een 'verlanglijstje'.

- > Alle gebruikersinteractie moet plaatvinden via de drie drukknoppen *UP*, *DOWN* en *SET* op het 7-segment-display.
- > Gebruikersdialogen voor:
 - datum en tijd instellen – als je lang op de knop *UP* of *DOWN* drukt, wordt de waarde automatisch verhoogd/verlaagd.
 - instellen van drempeltemperaturen voor in-/uitschakelen van de berekening.
 - berekening in- en uitschakelen.
 - verzenden van de gelogde gegevens.
 - wissen van de gelogde gegevens.
 - helderheid van het display instellen.
- > Communicatie met seriële apparaten:
 - temperatuursensor.
 - display (inclusief drukknoppen).
 - seriële uitgang.
- > Tijdstempel genereren.
- > Het uitvoerformaat van de gelogde gegevens moet zowel voor mensen als voor machines leesbaar zijn.
- > Alle runtime-parameters die door de gebruiker zijn ingesteld, moeten worden opgeslagen in EEPROM.
- > De gelogde gegevens moeten worden opgeslagen in EEPROM.

De software is opgezet als een toestandsmachine. Het 'hart' daarvan is een timergestuurde interrupt-serviceroutine die de temperatuursensor en de drukknoppen controleert en het display, de seriële uitgang en de magneetspoel aanstuurt (figuur 13).

Bedenkend dat we enerzijds tijdstempels moeten genereren en anderzijds serieel willen communiceren met de seriële apparaten (temperatuursensor, display en seriële uitgang), is de ATtiny84-controller

geconfigureerd voor een kloksnelheid van 1 MHz, wat een compromis is tussen stroomverbruik en snelheid. Dit voorkomt problemen met de beschikbare seriële 'bit-banging' softwarebibliotheken (bit-banging is een manier om software en I/O-lijnen te gebruiken om seriële communicatie te emuleren, meestal geïmplementeerd op specifieke hardware). Aangezien het register dat het interval van de timerinterrupt regelt 16 bit breed is, moet het interval van de timer-interrupt een heeltallige deler zijn van 1 s om te voldoen aan de specificatie van 'datum en tijd loggen'. De timer draait daarom op 20 Hz – en produceert elke 50 ms een timer-interrupt. Alle bedrijfsmodi (zie verderop) zijn gekoppeld aan event-gestuurde toestandsmachines [13] (geen polling). Alle gebruikersdialogen moeten dus zodanig worden opgebouwd dat ze niets blokkeren. Een voorbeeld van bit-banging wordt later besproken, samen met de broncode voor de seriële uitgang.

Interactie met de gebruiker

De drukknoppen zijn zo geplaatst dat ze intuïtief bediend kunnen worden (zie figuur 7). Met een beetje fantasie kan alle nodige informatie worden weergegeven op het 7-segments display (zie figuur 14).

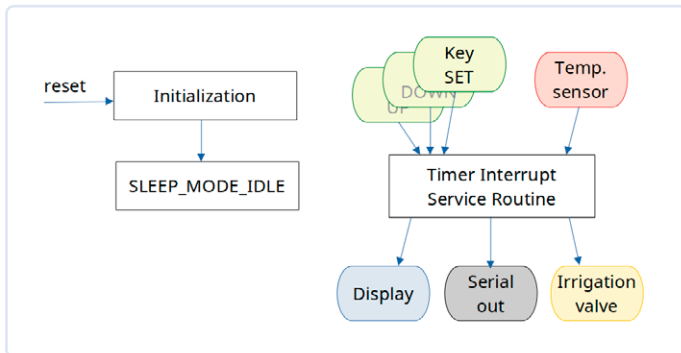
Bedrijfsmodi

Eén bedrijfsmodus, *Watch*, bewaakt de temperatuur. Als je de *SET*-knop lang indrukt in de *Watch*-modus, schakel je over naar de *Menu*-modus (met de gebruikersdialoog) en omgekeerd. In de *Menu*-modus (en alle volgende modi voor gebruikersinteractie) wordt de magneetspoel eerst uitgeschakeld. De *Menu*-modus bestaat uit een selectie van submodi waarin de gebruiker alle bedrijfsparameters van de controller kan instellen of wijzigen (in volgorde van verschijning):

- > gegevensoverdracht (*Data*-modus);
- > berekening aan/uit (*Irrigate*-modus);
- > helderheid instellen (*Brightness*-modus);
- > drempeltemperaturen instellen (*Temperature*-modus);
- > datum en tijd instellen (*Date_time*-modus).

Door herhaaldelijk op *UP* of *DOWN* te drukken, kun je door de menustructuur navigeren (figuur 15).

Bij de eerste run na het programmeren van de ATtiny84-controller is nog geen enkele runtime-parameter geconfigureerd. De regelaar start in de *Temperature*-modus gevolgd door *Date_time*-modus om de initiële runtime-parameters in te stellen. In alle gebruikersdialogen



Figuur 13. Blokschema van de software.

gaat de gebruiker door lang op de SET-toets te drukken terug naar de *Watch*-modus. Het display wordt altijd uitgeschakeld bij het verlaten van een gebruikersdialoog.

Gebruikersdialogen

Elk gebruikersdialoogvenster is geïmplementeerd in een modus-specifieke module (functie, subroutine).

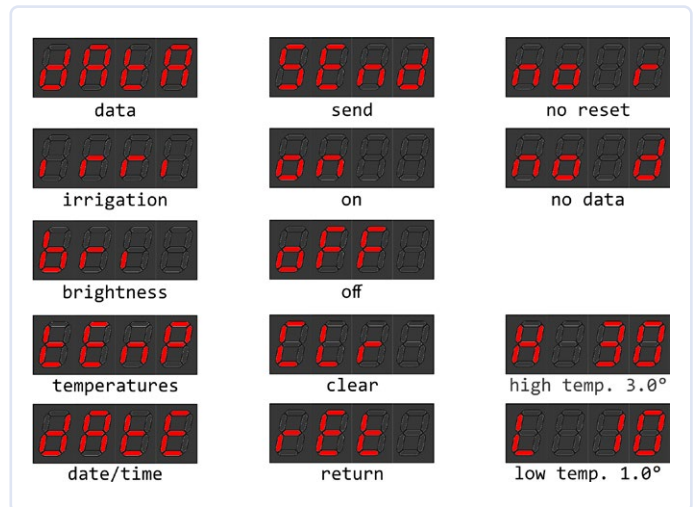
Berekening in- en uitschakelen (modus Irrigate)

Laten we als voorbeeld de beregeningsmodus bespreken met behulp van een stroomdiagram (figuur 16). Het event-gebaseerde ontwerp vereist het werken met interne submodi voor elke module. Alle modules beginnen met submodus 0 (voor initiële taken) en voeren eindtaken uit in de submodus *EXIT*. De submodus *EXIT* wordt ingesteld door het toetsbewakingsgedeelte van de interrupt-serviceroutine bij lang indrukken van de SET-toets. De beregeningsmodule is vrij eenvoudig en heeft één submodus (1) waarin het magneetventiel wordt in- of uitgeschakeld als de gebruiker de UP- of DOWN-toets indrukt. Het display toont de status van de elektromagneet. In de aan-status knippert het display.

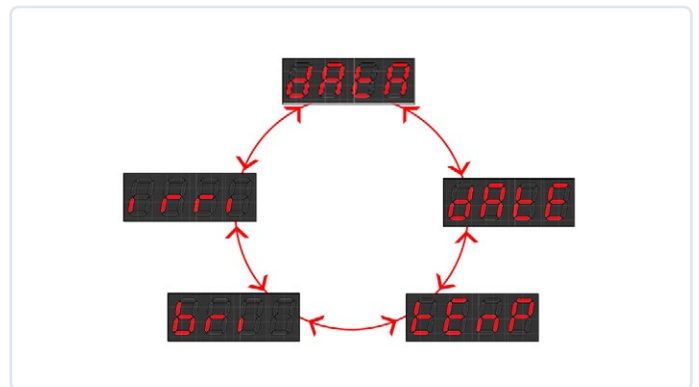
Instellen van datum en tijd (modus Date_time)

Instellen van datum en tijd gaat in enkele stappen:

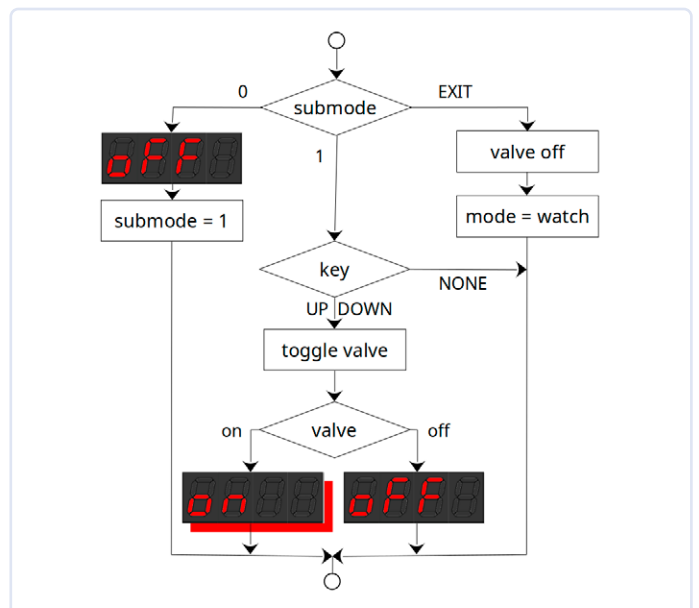
- | | | |
|----|---------|--|
| 1 | Begin | Toon jaar (display knippert). |
| 2 | UP/DOWN | Jaar op/neer (display knippert niet) |
| 3 | SET | Toon maand (display knippert) |
| 4 | UP/DOWN | Maand op/neer (display knippert niet) |
| 5 | SET | Toon dag (display knippert) |
| 6 | UP/DOWN | Dag op/neer (display knippert niet) |
| 7 | SET | Toon uur
(display en dubbele punt knipperen) |
| 8 | UP/DOWN | Uur op/neer (alleen dubbele punt knippert) |
| 9 | SET | Toon minuten
(display en dubbele punt knipperen) |
| 10 | UP/DOWN | Minuut op/neer |
| 11 | SET | Einde; datum en tijd opgeslagen
(mode dispatcher) |



Figuur 14. De berichten op het display.



Figuur 15. De circulaire menustructuur.



Figuur 16. Stroomdiagram van de beregeningsmodus.

Als je de knop *UP* of *DOWN* ingedrukt houdt, wordt de betreffende waarde automatisch verhoogd resp. verlaagd.

Instellen van de drempeltemperaturen (modus Temperature)

De temperatuur voor het inschakelen van de berekening wordt *low* temperatuur genoemd (default: 1,0 °C).

De temperatuur voor het uitschakelen van de berekening wordt *high* temperatuur genoemd (default: 3,0 °C).

Stappen om de temperaturen in te stellen:

- 1 Begin Toon H in eerste cijfer, high temperatuur (display knippert)
- 2 UP/DOWN High temperatuur op/neer (display knippert niet)
- 3 SET Toon L in eerste cijfer, low temperatuur (display knippert)
- 4 UP/DOWN Low temperatuur op/neer (display knippert niet)
- 5 SET Einde; high/low temperaturen opgeslagen (mode dispatcher)

Gelogde gegevens verzenden/wissen (modus Data)

Het dialoogvenster *send/clear data* hangt af van de status van de data.

Geen data beschikbaar:

- 1 Begin Toon no d (display knippert)
- 2 SET Einde

Data beschikbaar:

- 1 Begin Toon rEt (display knippert)
- 2 UP/DOWN Schakelt tussen display SEnd/rEt (display knippert niet)
- 3 SET
- 3.1 Display rEt: einde
- 3.2 Display SEnd
- 3.2.1 Data verzenden
- 3.2.2 Display CLr (display knippert)
- 3.2.3 UP/DOWN Schakelt tussen display rEt/CLr (display knippert niet)
- 3.2.4 Display CLr: data wissen en einde
- 3.2.5 Display rEt: einde

Display-helderheid instellen (modus Brightness)

- 1 Begin Toon briX, waarbij X is (0..7) (display knippert)
- 2 UP/DOWN Helderheid aanpassen, briX tonen (display knippert)
- 3 SET Einde. Helderheid opgeslagen (mode dispatcher)

Uitvoerformaat loggegevens

Het laatste item op het verlanglijstje wordt gerealiseerd met een 'goed afdrubbare' JSON-indeling.

Communicatie met seriële apparaten

De communicatie is gebaseerd op het werk van Davide Gironi [14] voor de temperatuursensor en van Łukasz Marcin Podkalicki [15] voor de TM1637 display/drukknopcontroller. Alle seriële communicatie is geïmplementeerd met behulp van 'bit-banging'-oplossingen.

Genereren van tijdstempels

Een tijdstempel wordt gegenereerd door timer-events te tellen. De timer is geconfigureerd in CTC-modus ([8], pagina 74) die elke 20 ms een interrupt-serviceroutine triggert. De tijdstempel is in het Unix-tijdstempelformaat voor de huidige epoch [16].

De temperatuur monitoren

De temperatuur wordt elke 10 s gecontroleerd. Om aan te geven dat de regelaar werkt, licht de dubbele punt van het display op tot de uitlezing van de DS18S20-sensor klaar is.

Voor het begin van de communicatie met de DS18S20 wordt deze 200 ms gevoed ('parasitaire voeding'). De communicatie begint met een reset van de sensor, uitgevoerd door een low-puls van 600 µs, die moet worden beantwoord met een low-puls na 100 µs. Als de reset wordt onderbroken, knippert het display en toont *no_r*, wat staat voor 'no reset possible'. Na een geslaagde reset begint de temperatuurconversie. Na de conversie worden de digitale temperatuurgegevens van de sensor uitgelezen. Als de bemonsterde waarde hoger is dan +40 °C of lager dan -20 °C, start de software de conversie opnieuw, omdat het resultaat van de bemonstering niet in eerste instantie kan worden vertrouwd.

Afgezien van *no reset possible* of een onzinnige geconverteerde waarde, kan het zijn dat er met de sensor iets vreemds is gebeurd. Dit wordt weergegeven door het knipperen van *no_d* voor 'geen data'. Als de *SET*-toets wordt ingedrukt, wordt de actuele gemeten temperatuurwaarde gedurende 10 seconden weergegeven.

Berekening

Als de temperatuur de low-drempel (standaard: 1,0 °C) bereikt, wordt er berekend. De berekening stopt als de temperatuur boven de high-drempel komt (standaard: 3,0 °C).

Tabel 1. Beregenings-intervallen.

Temperatuur (°C)	Sensor-waarde	Beregeningsmodus	Intervallen
1,0	2	1	constant aan
1,5	3	2	60 s aan / 1 * 30 s uit
2,0	4	3	60 s aan / 2 * 30 s uit
2,5	5	4	60 s aan / 3 * 30 s uit
3,0	6	5	60 s aan / 4 * 30 s uit

Address	Name	Value	Field	Option	Category	Setting
820000	LOW	7D	-	-	-	-
		3D	SUT_CKSEL	EXTXOSC_3MHZ_8MHZ_16KCK_14CK_65MS	Select Clock source	Ext. Crystal Osc. 3.0-8.0 MHz; Start-up time P
		1	CKOUT	CLEAR	Clock output on PORTB2	CLEAR
		0	CKDIV8	SET	Divide clock by 8 internally	SET
820001	HIGH	DF	-	-	-	-
		7	BODLEVEL	DISABLED	Brown-out Detector trigger level	Brown-out detection disabled
		1	EESAVE	CLEAR	Preserve EEPROM through the Chip Erase cycle	CLEAR
		1	WDTON	CLEAR	Watch-dog Timer always on	CLEAR
		0	SPIEN	SET	Serial program downloading (SPI) enabled	SET
		1	DWEN	CLEAR	Debug Wire enable	CLEAR
		1	RSTDISBL	CLEAR	Reset Disabled (Enable PB3 as i/o pin)	CLEAR
820002	EXTENDED	FF	SELFPGEN	CLEAR	Self Programming enable	CLEAR
830000	LOCKBIT	FF	LB	NO_LOCK	Memory Lock	No memory lock features enabled

Figuur 17. Fuse bits van de controller.

De kristallisatie van water is een langzaam proces. Gezien het feit dat vloeibaar water wegstroomt en dat de kristallisatiewarmte van het water gebruikt moet worden, besloot ik om gepulst te beregenen in plaats van het water constant te sproeien. De temperatuursensor stuurt de temperatuur als een 9-bit geheel getal met teken; de resolutie is 0,5 °C. De drempeltemperaturen worden opgeslagen met dezelfde resolutie. Zoals te zien in **tabel 1** wordt de berekening gestuurd door de *Irrigate*-modus op basis van de waarde die de temperatuursensor levert in combinatie met de low-drempeltemperatuur. De beregeningsmodus wordt gelogd.

Implementatie

MCU fuse bits

De fuse bits zijn ingesteld voor een externe 8MHz-klok en een interne deler door 8 (zie **figuur 17**).

Timer interrupt-serviceroutine

Telkens wanneer de interrupt-serviceroutine wordt gestart, worden verschillende taken uitgevoerd:

- controleer status druktoetsen
 - de resulterende status is *NONE/UP/DOWN/SET/UP_LONG/DOWN_LONG/SET_LONG*
- controle van de tellers voor knippertempo display en tijdstempel
- controle van knipperen display/dubbele punt
- dispatch bedrijfsmodus
 - *Watch* modus
 - *Menu* modus
 - *Data* modus
 - *Irrigate* modus
 - *Brightness* modus
 - *Temperature* modus
 - *Date_time* modus
- Actualiseren van runtime-parameters naar EEPROM

Globale en runtime parameters en meer

Hier is het ontwerp van de runtime-parameters in het SRAM-data-geheugen, gedupliceerd naar EEPROM:

```
/**
 * data types
 */
```

```
typedef struct
{
    int8_t low;
    int8_t high;
} temperatures_t;

typedef struct params
// runtime parameters / copy in EEPROM
{
    temperatures_t temperatures;
    // threshold temperatures
    temperatures_t minmax;
    // min/max temperatures sampled
    uint32_t timestamp;
    // 0 is January 1st, 1970, 00:00:00
    uint8_t brightness;
    // values 0...7
    int8_t write_index;
    // event data EEPROM write index
} params_t;
```

De runtime-parameterstructuur *params* slaat de drempeltemperaturen en de laagste en hoogste geregistreerde temperaturen op. De structuurleden *timestamp* en *brightness* zijn al besproken. Het lid *write_index* zorgt voor het schrijven van het beregenings-event naar EEPROM. Om de status van de verschillende bedrijfsmodi te beheren, wordt de globale structuur *globals* gebruikt:

```
/**
 * globals - see file "globals.h"
 */
typedef struct
{
    params_t params;
    // run time parameters
    uint8_t mode;
    // operation mode
    uint8_t submode;
    // sub mode
    uint8_t flash;
```

```

        // display/colon flash indicator
uint8_t    colon_status;
        // colon status off/on/flashing
uint8_t    display_status;
        // display status off/on/flashing

```

```

} globals_t;

```

De leden `mode` en `submode` zijn besproken bij de gebruikersdialoog voor het in- en uitschakelen van de berekening. De leden `colon_status` en `display_status` doen precies wat het commentaar in de listing zegt. Het lid `flash` wordt elke 400 ms omgeschakeld tussen 0 en 1 en samen met `colon_status` en `display_status` geëvalueerd om de bijbehorende knipper-actie uit te voeren met de dubbele punt en de 4 cijfers van het display. Elk beregenings-event wordt geregistreerd met een tijdstempel en de temperatuur. De geregistreeerde gegevens worden in het EEPROM-geheugen van de controller geschreven tot dat vol is. De EEPROM van de ATtiny84 heeft een grootte van 512 bytes. Een event neemt 6 bytes in beslag:

```

typedef struct    // irrigation event data
{
    uint32_t    timestamp;
                // time since 1970-01-01 00:00:00
    int8_t    temp;
                // binary temperature 0.5[°C] resolution
    uint8_t    irrigation_mode;
                // irrigation mode
} event_t;

```

De EEPROM bevat ook de runtime-parameters (10 bytes – zie hierboven). De EEPROM heeft dus een maximale capaciteit van $(512 - 10) / 6 = 83$ events. In de praktijk is gebleken dat dit voldoende is voor twee of drie nachten vorstbewaking.

Uitvoer van gelogde data

Door gebruik te maken van een mobiele telefoon met een USB OTG-adapter en een FT232RL seriële USB/TTL-adapter [17] (zie **figuur 18**) en een seriële terminal-applicatie, kunnen gegevens gedumpt worden met 19.200 baud in JSON-afdrukformaat.

Hier is een fragment van gelogde gegevensoverdracht van 2022-03-02. De variabelen `tH` en `tL` vertegenwoordigen de parameters voor de drempeltemperatuur. De variabelen `mH` en `mL` staan voor de bemonsterde maximum- en minimumtemperaturen. De data van beregenings-events heeft de variabelen:

- > `n` volgnummer
- > `ts` tijdstempel
- > `tm` temperatuur van beregenings-event
- > `im` beregenings-modus

```

{
  "tH": 3.0,
  "tL": 1.0,
  "mH": 12.0,

```



Figuur 18. De FT232RL-gebaseerde seriële USB/TTL-adapter, omgeven door krimpkous om hem tegen condensatievocht te beschermen.

```

    "mL": -3.5,
    "ev": [{
      "n": 0,
      "ts": "2022-03-02 20:31:14",
      "tm": 1.0,
      "im": 1
    }, {
      "n": 1,
      "ts": "2022-03-02 20:36:46",
      "tm": 1.5,
      "im": 2
    }],
    ...
}

```

Seriële overdracht

De seriële gegevensoverdracht maakt gebruik van de `uart_tx()`-functie (uit `uart.c`) die 'bit-banging' uitvoert bij 19.200 baud met een bitperiode van 52,1 μ s.

```

void uart_tx(register char data)
{
    register uint8_t bit = _BV(0);
    register uint8_t pb;


    UART_TXDRR |= _BV(UART_TXBIT);
        // out
    UART_TXPORT &= ~_BV(UART_TXBIT);
        // start bit
    _delay_us(42);
    while (bit) {
        pb = UART_TXPORT;
        if (data & bit)
            pb |= _BV(UART_TXBIT);
        else pb &= ~_BV(UART_TXBIT);
        UART_TXPORT = pb;
        _delay_us(41);
        bit <<= 1;
    }
    _delay_us(7);
    // compensation for end of while - last bit

    UART_TXPORT |= _BV(UART_TXBIT);
        // stop bit
    _delay_us(40);
    UART_TXDRR &= ~_BV(UART_TXBIT); // in
}

```

De vertragingstijden zijn aangepast aan de werkelijke bittijd van 52 μ s, dicht genoeg bij 52,1 μ s voor betrouwbare gegevensoverdracht binnen een breed temperatuurbereik. Mijn eerste implementatie werkte op 57.600 baud met een bittijd van 17,4 μ s. Dit werkte prima in mijn verwarmde ontwikkelruimte, maar was onbetrouwbaar bij lage temperaturen in mijn onverwarmde tuinhuisje.

Elektor Labs-webpagina

De software kan worden gedownload van de Elektor Labs-pagina bij dit project op [18]. Voel je vrij om daar opmerkingen over het project achter te laten! 

210272-03

Vragen of opmerkingen?

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



Over de auteur

Thomas Dausner (Dipl. Ing. FH) is elektrotechnisch ingenieur. Na zijn afstuderen in 1983 werd de invloed van IT steeds belangrijker in ontwikkelingslaboratoria en verschoof de nadruk van hardware naar software-ontwikkeling. Hij kreeg na de eeuwwisseling zin om toepassingen met MCU's te ontwikkelen na het bestuderen van artikelen in Elektor. Naast elektronica en het ontwikkelen van full-stack webapplicaties is Thomas Dausner een gepassioneerd duikinstructeur en onderwaterfotograaf.

Overzicht van de bestanden in de software-download

De software kan worden gedownload van de projectpagina van dit artikel [18].

Bestandsnaam	Doel
ds18x20.h	definities voor temperatuursensor
frostguard.h	projectdefinities
globals.h	definitie van globale parameters
time.h	definities voor CPU-snelheid en timerbesturing
tm1637.h	definities voor display en drukknop-uitlezing
uart.h	definities voor seriële TTL-uitgangbesturing
ds18x20.c	temperatuursensor-regeling
frostguard.c	<code>main()</code> -functie, timer interrupt-serviceroutine met mode dispatcher
globals.c	globale variabelen
mode_brightness.c	helderheidsinstelling
mode_data.c	data transfer
mode_datetime.c	datum- en tijdstelling
mode_irrigate.c	beregeing-testmodus
mode_menu.c	menu-modus

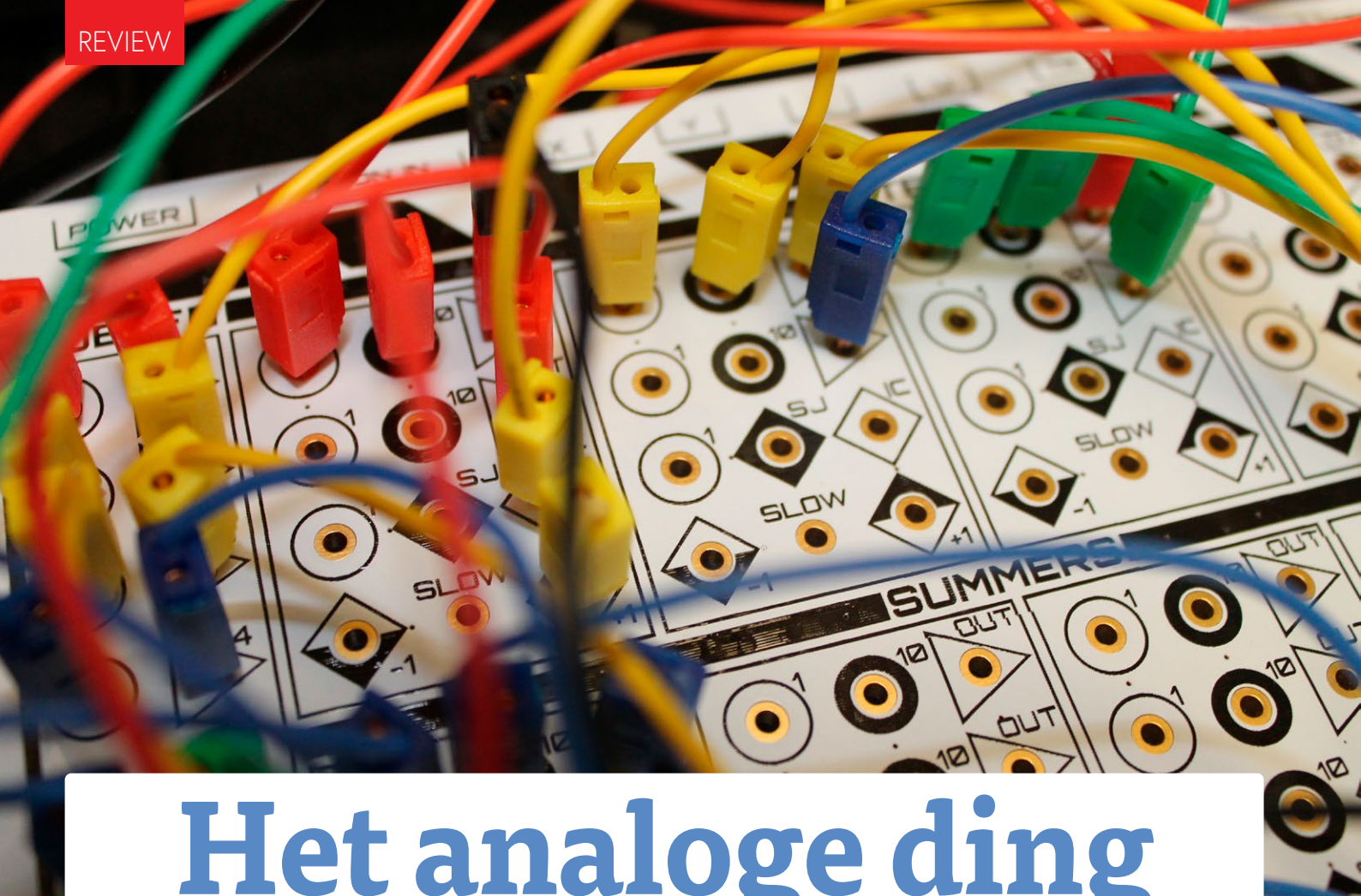


Gerelateerd product

> **Warwick A. Smith, *Explore ATtiny Microcontrollers using C and Assembly Language* (Elektor 2021)**
www.elektor.nl/20007

WEBLINKS

- [1] Rain Bird magneetventiel 100-HV: <https://mnrainman.com/100-HV>
- [2] Rondsproeier: <https://tinyurl.com/5br2xjc6>
- [3] FT232RL seriële USB/TTL-adaptor: <https://tinyurl.com/f6s9242w>
- [4] Nauwkeurige DS18S20 1-Wire digitale temperatuursensor datasheet: <https://tinyurl.com/4bd485aw>
- [5] Kabellengte voor LM35 en DS18B20: <https://ogalik.ee/cable-length-for-lm35-and-ds18b20>
- [6] IP65 ABS-behuizing 100x68x50 mm: <https://tinyurl.com/ypzbus49>
- [7] Connectorset 8 mm 2-polig met veervergrendeling: <https://tinyurl.com/mu263s5c>
- [8] Connectorset 12 mm 4-polig met veervergrendeling: <https://tinyurl.com/37wvm8c3>
- [9] ATtiny24/44/84 datasheet: <https://tinyurl.com/35mf4byw>
- [10] Viercijferig 7-segment-display van az-delivery: <https://tinyurl.com/3s8cz7wz>
- [11] TM1637 datasheet: <https://tinyurl.com/3btawxnp>
- [12] KiCad EDA Cross Platform: <https://kicad.org>
- [13] Eventgestuurd vs. polling: <https://tinyurl.com/nhdyk6t>
- [14] DS18x20 bibliotheek van Davide Gironi: <https://tinyurl.com/4zk2j8ku>
- [15] TM1637 bibliotheek van Łukasz Marcin Podkalicki: <https://github.com/lpodkalicki/attiny-tm1637-library>
- [16] Current Epoch Unix Timestamp: <https://unixtimestamp.com>
- [17] FT232RL seriële USB/TTL-adaptor: <https://az-delivery.de/products/ftdi-adaptor-ft232rl>
- [18] Software-download: <https://elektormagazine.com/210272-01>



Het analoge ding

de Arduino onder de analoge computers?

Clemens Valens (Elektor)

Voor de meeste mensen is een computer een digitaal elektronisch apparaat, zoals de laptop waarop ik deze review aan het typen ben. Er zijn echter ook andere soorten computers en een daarvan is de analoge computer. Hier bekijken we The Analog Thing (THAT), een open-source analoge computer ontworpen door het Duitse bedrijf Anabrid.

Een analoge computer?

In tegenstelling tot een digitale computer die discrete binaire waarden manipuleert, verwerkt een analoge computer data die worden weergegeven door continue fysische grootheden, zoals elektrische spanningen of mechanische bewegingen. Analoge computers kunnen complexe differentiaalvergelijkingen oplossen en fysische systemen in realtime simuleren. Ze werden gebruikt in vroege ruimtevaart- en militaire toepassingen, waar ze hielpen om complexe dynamische systemen en controletheorieën te begrijpen. De complexiteit, beperkte precisie en beperkte flexibiliteit van analoge

computers maken ze moeilijk te gebruiken. Daarom zijn ze in de meeste toepassingen verdrongen door digitale computers. En dit is waar het in Berlijn gevestigde bedrijf Anabrid om de hoek komt kijken. Hun (zelfopgelegde) missie is om de analoge computer opnieuw te introduceren als aanvulling op de digitale computer om de wet van Moore in leven te houden, energie te besparen en de veiligheid te verbeteren. Een van hun middelen om hun missie te bereiken is The Analog Thing (afgekort THAT).

Een intrigerende gebruikersinterface (IUI)

The Analog Thing is een platte, rechthoekige (20 bij 24 cm) sandwich van twee witte printen (PCB's) met een hoogte van ongeveer 38 mm. De onderste print bevat alle elektronische componenten. De (dikke) bovenste print vormt de gebruikersinterface met intrigerende symbolen die in het zwart zijn opgedrukt. Ongeveer de helft van het oppervlak is gereserveerd voor een 17 × 10 patchpanel. Elk patchgat bevindt zich in het midden van een grafisch symbool: een cirkel, een ruit of een driehoek. Driehoeken zijn wit, cirkels zijn wit of zwart en ruiten zijn er in wit, zwart en half-wit/half-zwart (zie **figuur 1**).

Het patchpanel is onderverdeeld in 17 rekenelementen waarbij elk element een wiskundige functie voorstelt, zoals integrator (5×), vermenigvuldiger (2×), opteller (4×), inverter (4×) en comparator (2×). Er zijn ook acht coëfficiënten en vier ±1 constanten. Onder het patchpanel zitten nog twee rijen gaten met condensatoren (5×), diodes (4×), zenerdiodes (2×) en vier signaaluitgangen.

Het patchpanel wordt van het bedieningspaneel gescheiden door de naam van het apparaat, die van links naar rechts in grote letters is afgedrukt. Het bedieningspaneel bestaat uit negen potentiometers (COEFF 1 tot 8 en OP-TIME) en twee draaischakelaars (COEFFICIENT en MODE). Er is ook een numerieke LCD-paneelmeter terwijl drie LED's wat statusinformatie geven.

Aan de bovenkant van THAT vinden we alle aansluitingen: voeding (USB-C, alleen een kabel wordt meegeleverd, geen voeding), uitgangen (RCA, een stereokabel wordt meegeleverd) en verlenging (pinheaders, een 2 x 5 flatcable is meegeleverd).

Patchkabels

Net als digitale computers doet THAT niets zonder een programma. Het laden van software is echter geen kwestie van het aansluiten van een USB-stick of een microSD-kaart. Programmeren doet men door patchkabels met 2mm-banaanstekkers in de gaten van het patchpanel te steken. The Analog Thing wordt geleverd met 30 patchkabels in vijf kleuren.

Display niet inbegrepen

The Analog Thing produceert analoge signalen in de vorm van spanningen in het bereik van -1 V tot +1 V (de precisie van THAT is ongeveer 1%). Een signaal kan toegankelijk worden gemaakt op vier uitgangconnectoren X, Y, Z en U. Om ze zichtbaar te maken is een oscilloscoop of een computer met geluidskaart (of andere analoge ingang) nodig. In veel gevallen wil men een XY(Z)-weergave, dus moet de oscilloscoop een XY(Z)-modus hebben. Voor optimale resultaten moeten deze ingangen DC-gekoppeld zijn. Daarom is een geluidskaart niet de beste optie.

THAT kan tot vier signalen uitvoeren, en dus is een vierkanaals oscilloscoop ideaal. Het is daarom een beetje jammer dat de uitgangconnectoren RCA-typen zijn en geen BNC. Dit is waarschijnlijk gedaan om de kosten laag te houden en alles passend te maken. RCA/BNC-adapters worden niet meegeleverd.

De paneelmeter is een 3,5-cijferige (± 1.999 counts) voltmeter (**figuur 2**). Voor zover ik kon vaststellen, kan deze echter niet worden aangesloten

op signalen die door de rekenelementen van de unit worden geproduceerd. Hij wordt gebruikt om de waarden van de coëfficiënten weer te geven en om de uitvoeringssnelheid te tonen.

Master/minion-keten

Een laatste opmerking voordat we ingaan op het programmeren van THAT is de uitbreidingsoptie. Als er meer rekenelementen nodig zijn dan er beschikbaar zijn op de THAT, is het mogelijk om een of meer units in serie te schakelen. De eerste zal de master zijn, terwijl de anderen de 'minions' zijn. Het aantal elementen in een keten is in theorie onbeperkt.

Terzijde: ik ben andere pogingen tegengekomen om het master/slave-paradigma uit de elektronica te verwijderen, maar nog nooit deze. Ook al vind ik het best aardig, ik weet niet zeker of ik het wel moet overnemen, omdat master en minion allebei met een 'm' beginnen. Op een SPI-bus bijvoorbeeld zouden MISO (Master In Slave Out) en MOSI (Master Out Slave In) allebei MOMI worden. Misschien master hernoemen naar 'Gru'?* Dat zou GIMO & GOMI opleveren...

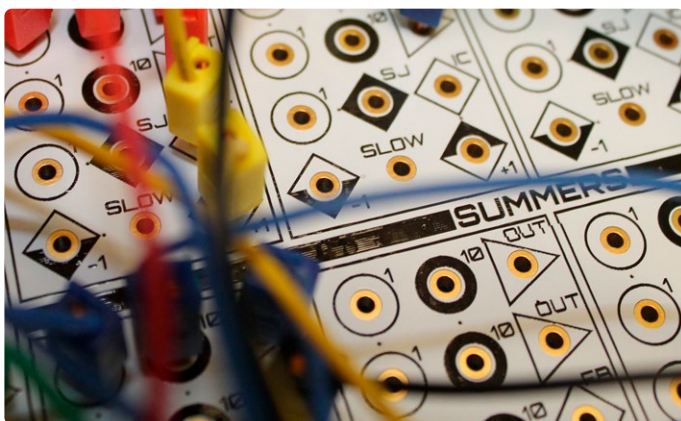
Wat kunnen we ermee doen?

Het programmeren van The Analog Thing gebeurt niet door vreemde commando's in een terminal of teksteditor te typen, maar door kabels in het patchpanel te steken. Het is vergelijkbaar met visueel programmeren waarbij functionele blokken worden verbonden met virtuele draden. Een analogo programma is een wiskundige uitdrukking die een dynamisch systeem beschrijft, dat wil zeggen een systeem dat in de tijd evolueert volgens bekende relaties. Om THAT iets nuttigs te laten doen, moet men dus eerst een geschikt wiskundig model bedenken. Dit alleen al maakt analogo rekenen bijna ontoegankelijk voor de meeste stervelingen. Geloof het of niet, maar differentiaalvergelijkingen zijn gewoon niet zo populair als Python of TikTok.

Voorbeeldprogramma's

Om de gebruiker op weg te helpen met analogo programmeren op THAT, bevat de handleiding negen voorbeelden, van wiskundige rariteiten tot toepassingen uit de echte wereld. Elk voorbeeld legt uit welk

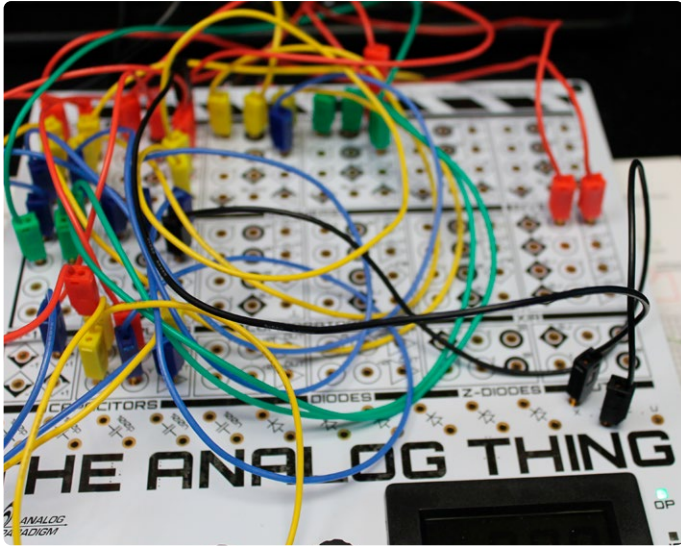
* *Felonius Gru is de superschurk die weer een held wordt, geholpen door een leger gele volgelingen die populair zijn geworden door de "Despicable Me"-filmserie.*



Figuur 1. Vreemde symbolen in zwart-wit die op het patchpanel zijn gedrukt, bieden een leidraad bij het programmeren van THAT.



Figuur 2. De paneelmeter dient om de waarden van de coëfficiënten in te stellen, niet om de signalen van het analoge programma weer te geven.



Figuur 3. Zoals het gezegde luidt: 'chaos in, chaos uit.' Deze chaotische patchkabel-spaghetti implementeert een Lorenz attractor, de 'Hello World!' van de chaostheorie.

model het implementeert, presenteert de wiskundige vergelijkingen en het bijbehorende signaal-stroomdiagram, het bekabelingsdiagram (de patch) en de te verwachten uitvoergrafiek.

Om een patch aan te brengen, sluit men de patchkabels aan op THAT volgens het bekabelingsschema. Voor degenen die oud genoeg zijn om dat gedaan te hebben: dit moet met dezelfde zorg gedaan worden als het kopiëren van een BASIC-programma uit een computertijdschrift in de jaren tachtig. Eén fout en het programma werkt niet. Het gevaar is hier niet zozeer om een kabel in het verkeerde gat te stoppen, aangezien de veelkleurige patchdiagrammen heel duidelijk zijn, maar om een kabel te vergeten. Het is niet eenvoudig om de spaghetti van patchkabels door te spitten om erachter te komen welke draad verkeerd is of ontbreekt (figuur 3).

Instellen van de coëfficiënten

Nadat THAT is gepatcht, moet men de coëfficiënten instellen die in de patch worden gebruikt. Een coëfficiënt is gewoon een 'volume'-potentiometer die zijn ingang heeft in de COEFF-sectie. Om de waarde van een coëfficiënt in te stellen, zet u de COEFFICIENT-schakelaar op het nummer van de coëfficiënt (1 tot 8) en de MODE-schakelaar op COEFF. Het LC-display toont nu de waarde van de coëfficiënt. U kunt deze aanpassen door aan de bijbehorende potentiometer te draaien. Precisie tot op drie decimalen is haalbaar (met wat geduld). Merk op hoe in het voorbeeld van de Lunar Landing twee coëfficiënten in serie worden gezet om een nog hogere precisie te krijgen.

Een analogo programma uitvoeren

Nu is het tijd om de patch uit te voeren. Draai hiervoor de MODE-schakelaar naar de OP-positie. De OP-LED gaat aan. Sluit een geschikt weergaveapparaat aan op de uitgangen van THAT. Het voorbeeld van de Lunar Landing heeft drie uitgangssignalen (X, Y en U), dus een driekanaals display zou het beste zijn.

In de OP-modus wordt de patch één keer uitgevoerd. In REP-modus wordt de patch herhaaldelijk uitgevoerd. REPF-modus herhaalt 100x sneller dan REP-modus. Merk op dat elke herhaling voorafgegaan wordt door een herstart van de patch, omdat de integratoren gereset moeten worden naar hun begintoestand. Dit maakt het ingewikkeld om een soepel herhalende patch te maken. Geïnteresseerden die THAT willen

gebruiken in bijvoorbeeld muzikale toepassingen zijn waarschijnlijk beter af met continu evoluerende patches dan met herhalende patches.

Hallo, analoge wereld!

Het eerste voorbeeld uit de handleiding, *Radioactive Decay*, kan waarschijnlijk worden beschouwd als het equivalent van het 'Hello World!'-voorbeeld in digitale computerprogramming. Het implementeert een eerste-orde differentiaalvergelijking die welbekend is bij elektronicaliefhebbers, omdat deze ook van toepassing is op het ontladen van een condensator C via een weerstand R:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{V(t)}{RC}$$

Het voorbeeld gebruikt λ in plaats van $1/(RC)$ en V wordt N genoemd, maar dat verandert er niets aan.

De patch heeft zes draden nodig en werkt in REP-modus. De oscilloscoop toont een mooie exponentiële curve die radioactief verval voorstelt (of een condensator die zich via een weerstand ontlad, zie figuur 4). Potentiometer 1 regelt de amplitude, potentiometer 2 de steilheid.

Als tweede voorbeeld probeerde ik de *Lorenz Attractor*, gerelateerd aan het bekende vlindereffect (een minuscule verandering in een vroege systeemtoestand kan resulteren in enorme verschillen in latere toestanden). Deze complexe patch verbruikt 22 draden (zie figuur 3), en zes coëfficiënten moeten zorgvuldig één voor één worden aangepast. Een tweekanaals (analoge) oscilloscoop in XY-modus geeft de beste resultaten. Ik slaagde erin het programma zonder fouten te patchen en werd vervolgens gehypnotiseerd door de continu veranderende grafiek.

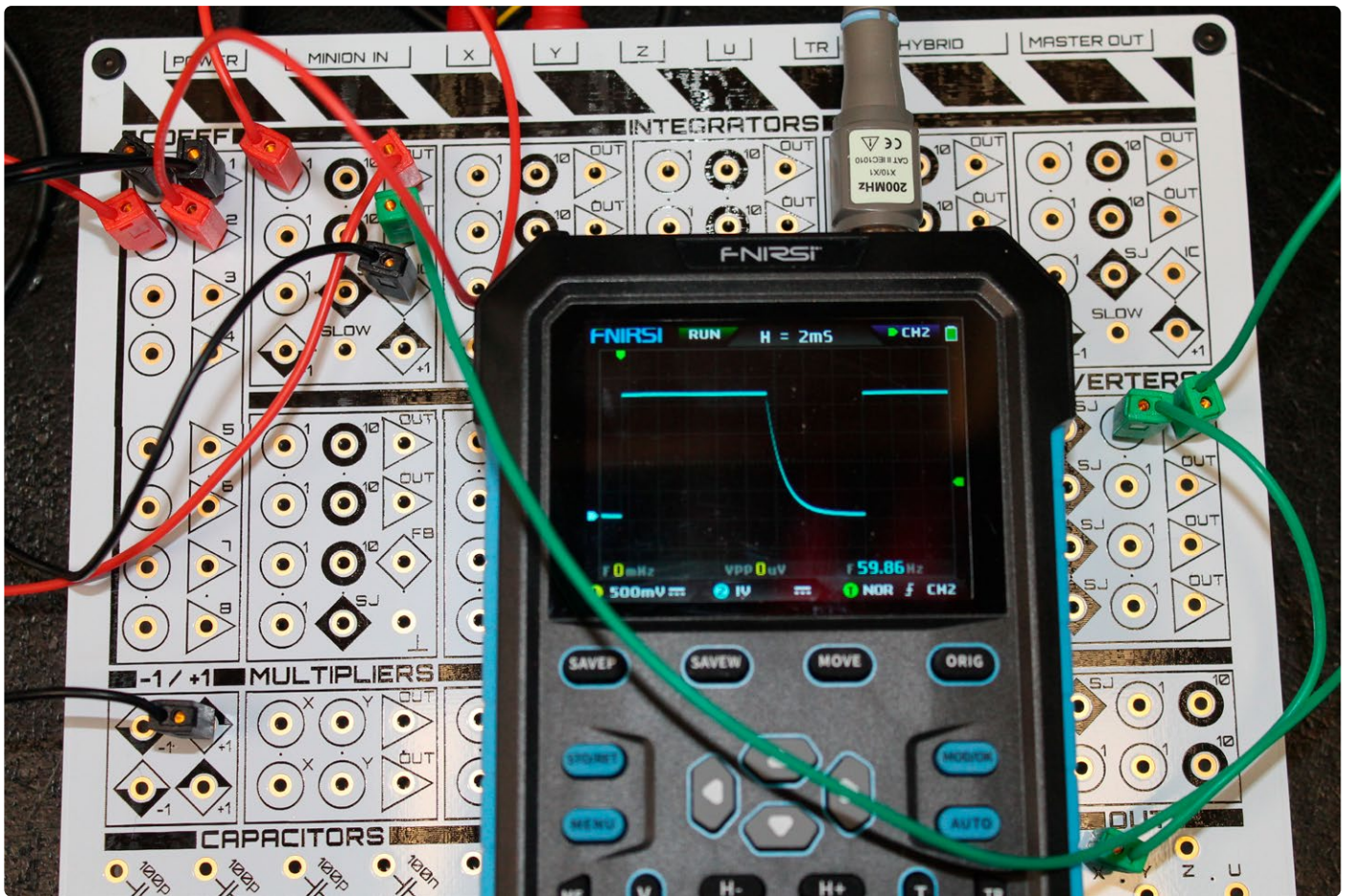
Voornamelijk een educatief hulpmiddel

De kwaliteit van The Analog Thing is uitstekend. Hij is mooi gemaakt en goed doordacht. De patchgaten, zij het eenvoudige vergulde gaten, zorgen voor een goed contact, zelfs met soms wiebelige banaanstekker-patchkabels. De uitlezingen op het LC-display zijn stabiel en de potentiometers draaien soepel.

Elektronica-ingenieurs kunnen zich aangetrokken voelen tot THAT omdat ze gewend zijn aan schakelingen met integratoren en andere rekenelementen die erop te vinden zijn. Het omzetten van een eenvoudig model in een patchdiagram moet voor bepaalde enthousiastelingen te doen zijn, maar hoe men de vergelijkingen van de Euler Spiral van voorbeeld 9.5 moet omzetten heeft wat meer uitleg nodig dan in het 'First Steps'-boekje staat. Het willekeurig insteken van draden zal hoogstwaarschijnlijk resulteren in frustrerend vlakke uitgangen die clippen bij de min- of max-waarde.

Misschien wordt The Analog Thing op een dag wel de Arduino van de analoge computers, ondersteund door duizenden zelfgemaakte modellen en patchdiagrammen. De initiële voorwaarden voor een enorme populariteit zijn gezet. Net als Arduino is THAT open source en de ontwerpbestanden zijn te vinden op GitHub [1]. Tot op dit moment is THAT echter vooral een educatief hulpmiddel en een curiositeit voor mensen die geïnteresseerd zijn in het spelen met wiskundige modellen. Hoe dan ook, wat men er ook mee doet, het is een geweldig gespreksonderwerp. ◀

vertaling: Willem den Hollander — 240391-03



Figuur 4. De 'Hello World!' in analog rekenen is de uitvoer van een eerste-orde differentiaalvergelijking. Let op het horizontale deel, dat wordt veroorzaakt door de initialisatie-sequentie.

Vragen of opmerkingen?

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



Gerelateerde producten

- > **The Analog Thing (THAT) Analog Computer**
www.nl.com/20918
- > **Siglent SDS1104X-E 4-ch Oscilloscope (100 MHz)**
www.elektor.nl/19370



WEBLINK

[1] The Analog Thing op GitHub: <https://github.com/anabrid>

Zuinige relaisdriver

spaart 90% speelstroom

Frank Bachmann (Duitsland)

Nu de energiekosten door het dak gaan, moeten we elke kans aangrijpen om daarop te besparen, al is het maar een beetje. Het viel me op dat een relaispoel die eigenlijk gevoed moet worden met de lichtnetwisselspanning, vier keer meer energie gebruikt dan de spoel van een vergelijkbaar DC-relais. Door de spoel slim aan te sturen, kunnen we zelfs nog meer energie besparen.

Het datasheet voor een DC-relais geeft over het algemeen een nominale spoelspanning en een houdspanning. Als we de nominale spanning op de spoel zetten, wordt het anker aangetrokken en schakelen de contacten om. Als het relais eenmaal is geschakeld, kunnen we de spanning laten zakken tot de houdspanning voordat het relais weer afvalt. Als we dat weten, kunnen we een efficiënte relaisdriver ontwerpen, die veel minder energie gebruikt dan de standaard aan/uit-driver. Als we bijvoorbeeld de spoelspanning kunnen halveren, daalt het opgenomen vermogen tot 25%. Bij deze schakeling reduceren we de spanning tot één derde van de nominale spanning en brengen daarmee het opgenomen vermogen terug van 400 mW tot slechts 45 mW!

Het schema

De DC-voeding voor het relais wordt verkregen met behulp van een klassieke capacatieve voedingsconfiguratie. De waarde van de koppelcondensator wordt hier zo gekozen dat de spanning over de relaispoel één derde is van de nominale spanning van het relais. Het relais wordt bestuurd met een spanningsafhankelijke schakeltrap. Die zorgt ervoor dat het relais kort zijn nominale spanning krijgt bij het inschakelen, zodat het betrouwbaar aantrekt. Daarna zakt de spanning naar de houdwaarde van 4 V voor een 12V-relais.

De schakeling is eerst gesimuleerd met MultiSim [1] (figuur 1), en de componentwaarden zijn aangepast om een relaisspanning van 4 V te bereiken. Met deze simulatie kon ook de energiebesparing van de schakeling worden vastgesteld. Uit de gesimuleerde stromen en spanningen bleek dat er een flinke energiebesparing werd behaald en dat het relais betrouwbaar zou werken. Daarna werd een praktische schakeling ontworpen (figuur 2). Weerstand R1 aan de ingang K1 van de schakeling dient als stroombegrenzing en als zekering. De condensatoren C2 en C3 staan parallel. Ze vormen een capacatieve serie-impedantie. De waarde van deze condensatoren is zo gekozen dat er ongeveer eenderde van de nominale spanning over de relaispoel staat in actieve toestand. De minimale houdspanning en de spoelweerstand van het relais zijn te vinden in het datasheet van de fabrikant. Met de volgende formule kunnen we dan de waarden voor C2/C3 berekenen:

$$C = \frac{I_{\text{relais}} \times k}{2\pi \times f \times U}$$

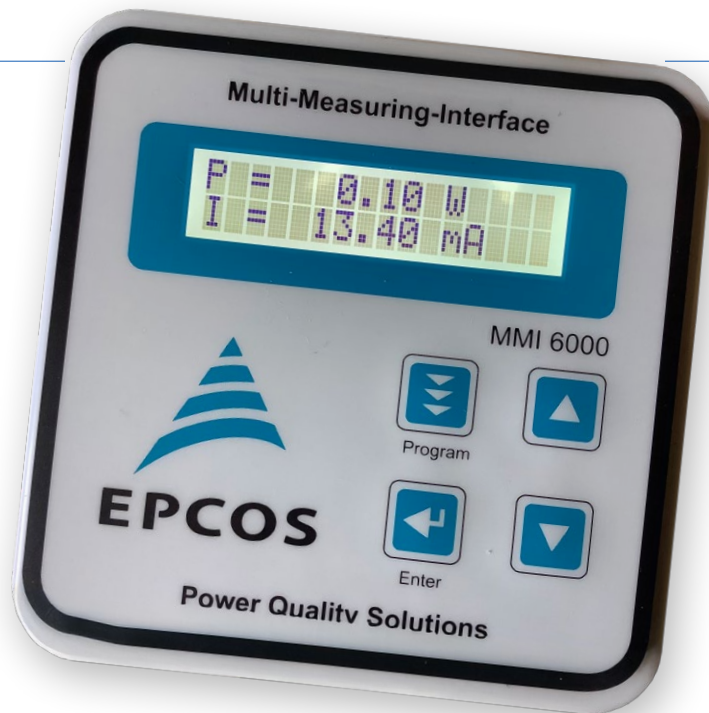
$$= \frac{11111 \mu\text{A} \times 1,12}{2 \times 3,1416 \times 50\text{Hz} \times 230\text{V}}$$

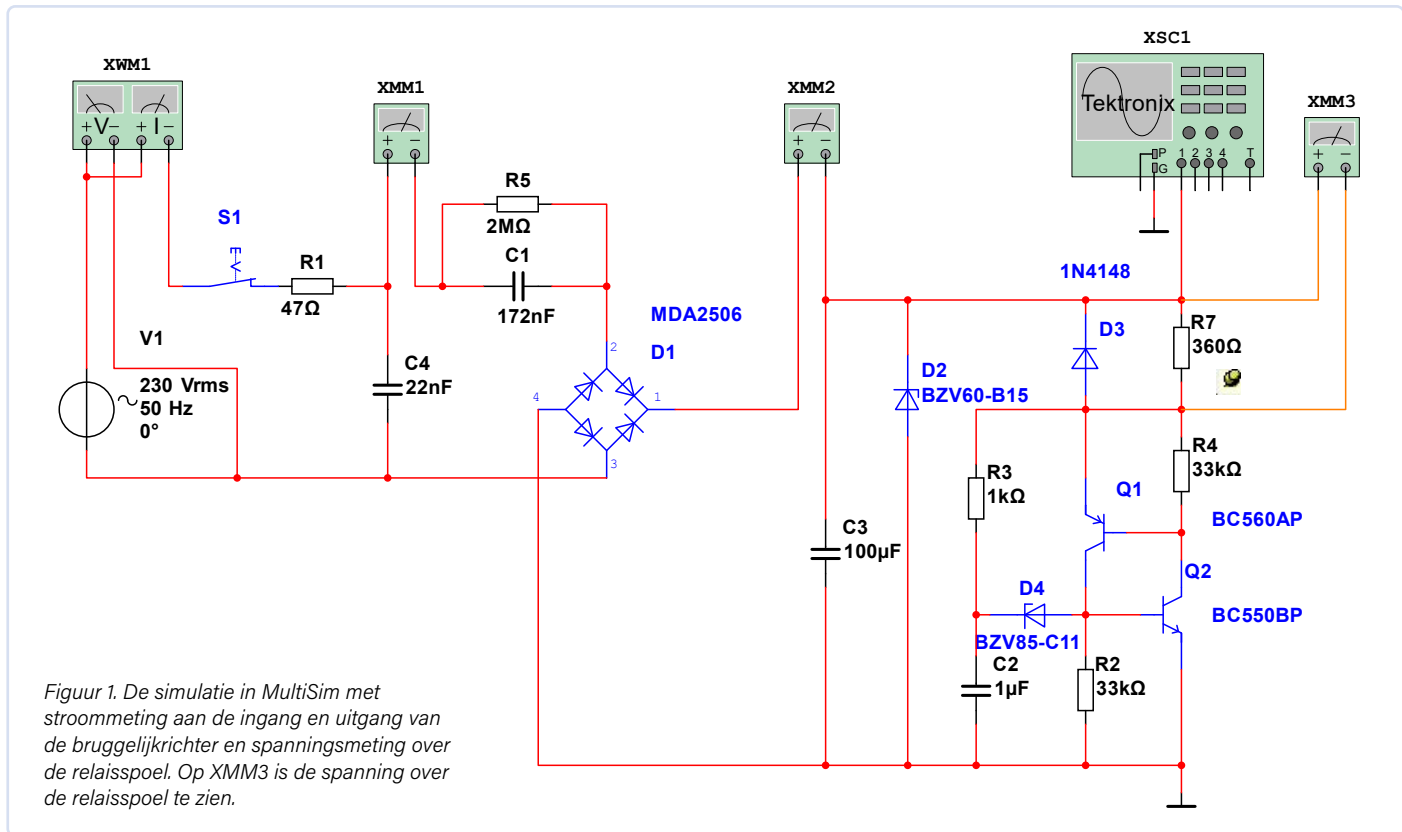
$$= 0,1722 \mu\text{F}$$

waarin:

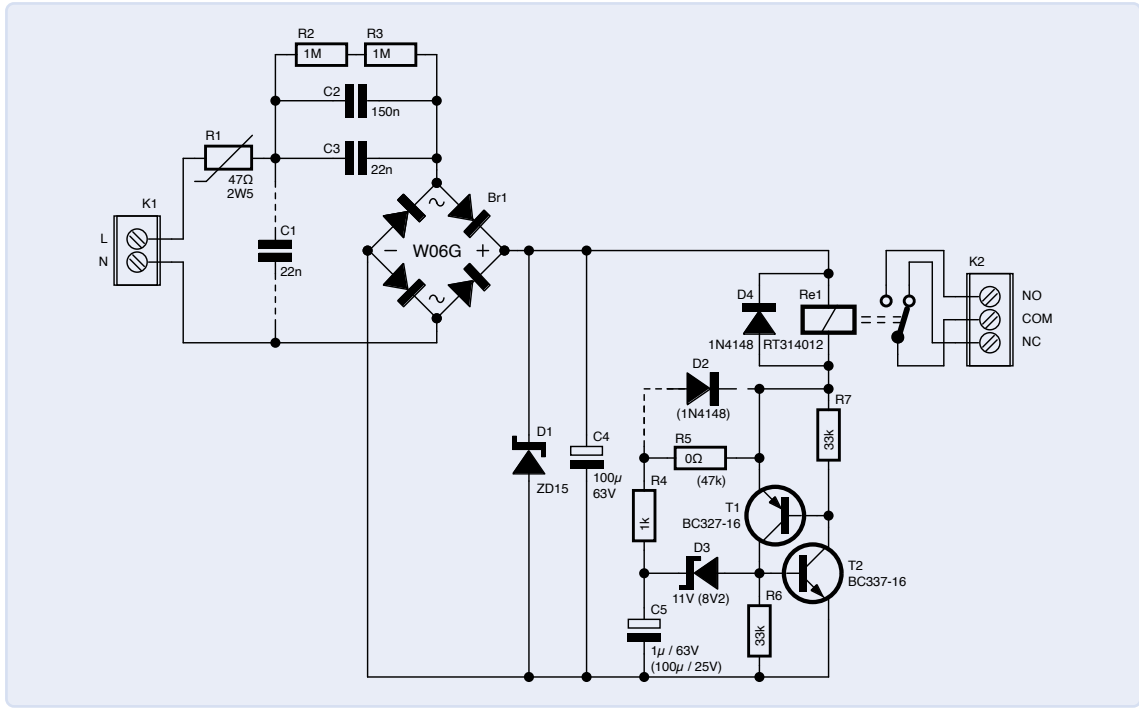
- > k: correctiefactor voor de verhouding tussen wisselstroom en gelijkstroom
- > I_{relais} : relaisstroom bij 4,0 V (bij een spoelimpedantie van 360 Ω)

De bepalende factor in deze formule is de stroom door de relaispoel als de spanning wordt gereduceerd tot de houdspanning. De correctiefactor in de formule is een geschatte waarde die rekening houdt met de theoretische verhouding van 1,41 tussen wissel- en gelijkspanning, de resulterende stroomverhouding en de spanningsval over de bruggelijkrichter en de transistoren. Voor een 12V-relais gebruiken we de factor 1,12, voor een 24V-relais nemen we 1,14. Deze waarden zijn bepaald door praktijktests en met simulaties in MultiSim. Reken tip: als u in de formule de stroom in microampère invoert, krijgt u als uitkomst meteen de capaciteit in microfarad. R2 en R3 zorgen voor het ontladen van de beide condensatoren. Er zijn twee weerstanden in serie gebruikt om de maximaal toegestane spanning per weerstand niet te overschrijden. De bruggelijkrichter (Br1) werkt samen met elco C4 als reservoir- en afvlakcondensator. De zenerdiode over C4 voorkomt





Figuur 1. De simulatie in MultiSim met stroommeting aan de ingang en uitgang van de bruggelijkrichter en spanningsmeting over de relaispoel. Op XMM3 is de spanning over de relaispoel te zien.

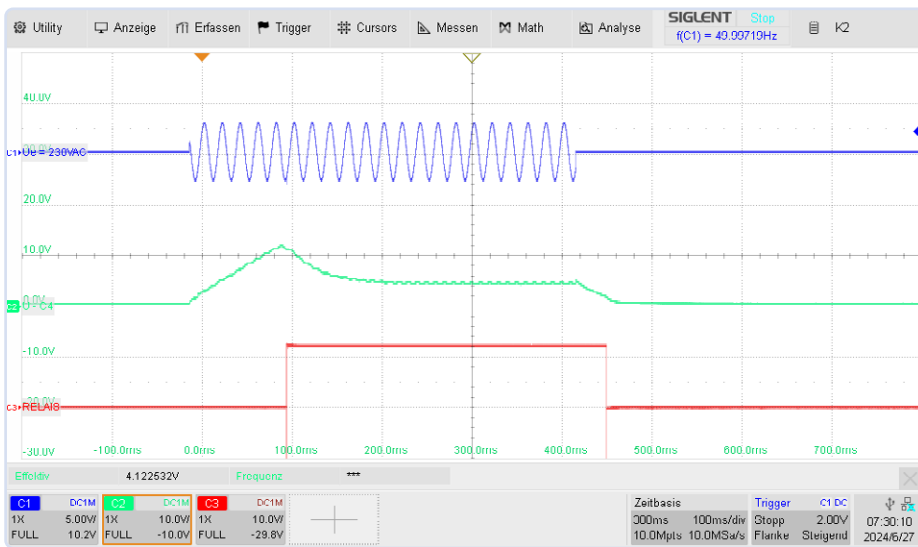


Figuur 2. Het definitieve schema van het zuinige netspanningsrelais. De componentwaarden voor de versie met inschakelvertraging staan tussen haakjes.

dat er teveel spanning over de elco komt te staan als de relaispoel defect is. Condensator C4 begint op te laden als de schakeling met de netspanning wordt verbonden. Dat is te zien aan het blauwe spoor in de oscilloscoopweergave in **figuur 3**. C5 laadt met C4 mee op via de relaispoel en weerstand R4 (zie het groene spoor) totdat de

zenerspanning van D3 wordt overschreden. Op dat moment gaat er een stroom lopen in de basis van T2, zodat die wordt opengestuurd en daardoor komt ook T1 in geleiding. De beide transistoren houden elkaar vanaf nu in geleiding; ze fungeren samen als een getriggerde thyristor. Het relais wordt met zijn nominale spanning ingeschakeld (groene spoor). Maar

de capacatieve voeding kan niet meer leveren dan de stroom waarvoor we hem gedimensioneerd hebben. Daardoor zakt de spanning over C4 naar de houdwaarde. Er loopt nu geen triggerstroom meer, want de spanning over de zenerdiode is afgenomen. C1 dient voor het afvoeren van overtollige energie. Dat is nodig omdat het anders zou



Figuur 3. Oscilloscoopsporen van het schakelen van de netspanning (via een deler) op kanaal 1 (blauw), de spanning over condensator C4 op kanaal 2 (groen) en de spanning op het relaiscontact op kanaal 3 (rood).

kunnen gebeuren dat C4 langzaam oplaadt, ook als er geen spanning op K1 hoort te staan: open schakelaars kunnen een lekstroom hebben vanwege de capaciteit tussen de geopende contacten. Dat zou ertoe leiden dat het relais onbedoeld even inschakelt. C1 dient dus als een soort belasting van de 'open' schakeling, die deze lekstroom afvoert. Omdat het even duurt voordat C4 is opgeladen, heeft de schakeling een kleine inschakelvertraging van ongeveer 100 ms.

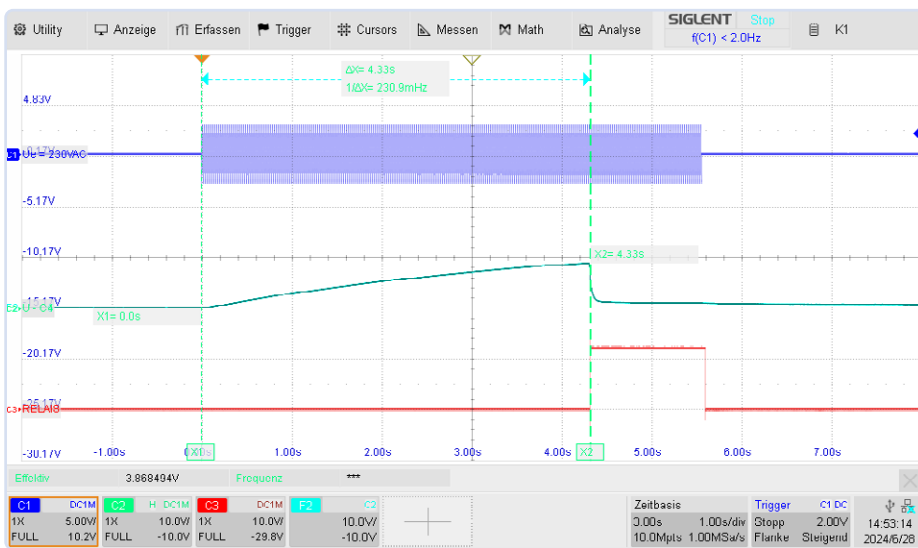
Inschakelvertraging

Met wat kleine aanpassingen kan dezelfde schakeling op dezelfde print ook zorgen voor een langere inschakelvertraging. Dit kan bijvoorbeeld nuttig zijn om de luidsprekers van een versterker met een schakelende voeding vertraagd in te schakelen. In zo'n geval willen

we bij het uitschakelen juist dat de luidsprekers als eerste uitgeschakeld worden en dat kan deze schakeling, omdat die werkt met de ingangsspanning aan de primaire kant van de voedingstrafo.

Om een inschakelvertraging te bouwen, voegen we R5 parallel aan D2 toe, we verhogen de waarde van C5 en we gebruiken een andere zenerdiode D3. Diode D2, die spert als C5 wordt opgeladen, zorgt ervoor dat C5 wordt ontladen als het relais inschakelt. Dat zorgt ervoor dat de schakeling dezelfde vertragingstijd produceert als hij kort na het uitschakelen weer wordt ingeschakeld.

Bij de hier getoonde dimensionering is de vertragingstijd ongeveer 4 seconden, zoals te zien is in het oscillogram in **figuur 4**. De uitschakelvertraging, dat is de tijd tussen het wegvallen van de netspanning en het afvallen



Figuur 4. Netspanning (blauw), spanning op condensator C4 (groen) en relaiscontactspanning (rood) voor de versie met inschakelvertraging.

Onderdelenlijst

De hier gegeven waarden resulteren in een heel korte inschakelvertraging (de waarden tussen haakjes geven een inschakelvertraging van ongeveer 4 s).

Weerstanden:

- R1 = 47 Ω, 2,5 W, fusible weerstand VSW 2,5-47
- R2,R3 = 1 M
- R4 = 1 k
- R5 = 0 Ω of draadbrug (47 k)
- R6,R7 = 33 k

Condensatoren:

- C1 = 0,022 μ, 250 VAC, X1/X2 (optioneel, zie tekst)
- C2 = 0,15 μ, 250 VAC, X1/X2, voor 12V-relais met 360Ω-spoel
- C2 = 0,068 μ, 250 VAC, X1/X2, voor 24V-relais met 1440Ω-spoel
- C3 = 0,022 μ, 250 VAC, X1/X2
- C4 = 100 μ, 25 V (12V-relais)
- C4 = 100 μ, 35 V (24V-relais)
- C5 = 1 μ, 63 V (100 μ, 25 V voor 12V-Relais, 100 μ, 35 V voor 24V-relais)

Halfgeleiders:

- D1 = zenerdiode 15 V voor 12V-relais, 30 V voor 24V-relais
- D2 = niet gemonteerd (1N4148)
- D3 = zenerdiode 11 V voor 12V-relais, 22 V voor 24V-relais (8,2 V voor 12V-relais, 16 V voor 24V-relais)
- D4 = 1N4148
- Br1 = bruggelijkrichter 1 A, >200 V, bijv. W06G
- T1 = BC327
- T2 = BC337

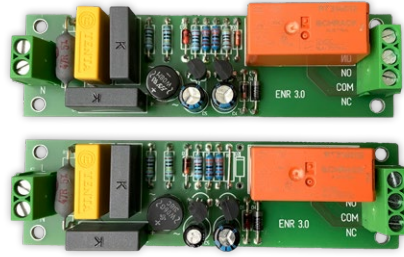
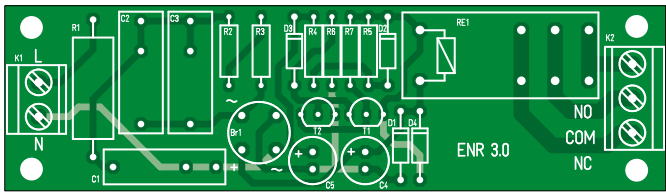
Diversen:

- Re1 = relais 12 V (360Ω-spoel), bijv. Schrack RT314012
- Re1 = relais 24 V (1440Ω-spoel), bijv. Schrack RT314024
- K1 = 2-polige printkroonsteen, raster 7,5 mm
- K2 = 3-polige printkroonsteen, raster 7,5 mm

van het relais, is ongeveer 45 ms. We kunnen die tijd korter maken door de waarde van C4 te reduceren van 100 μF tot 33 μF.

Energiebesparing

Ter vergelijking: een equivalent relais met een 230VAC-spoel verbruikt ca. 1,6 W. Onze schakeling gebruikt maar 0,1 W! Dat is een vermogensbesparing van 1,5 W. Op jaarbasis kan dat 13 kWh schelen bij continue gebruik.



Figuur 5. Print-layout en componentenopstelling.

En een DC-relais is ook nog eens veel goedkoper dan een wisselstroomrelais.

Waarschuwing: deze hele schakeling werkt met de dodelijke netspanning. Het is dus absoluut noodzakelijk om hem in te bouwen in een apparaat of een eigen behuizing om te voorkomen dat hij wordt aangeraakt of in contact komt met geleidend materiaal! Bij de opbouw van de schakeling moet overal voldoende afstand tussen de sporen en componenten worden gehouden.

Keuze van de componenten

Het efficiënte netspanningsrelais wordt opgebouwd op een kleine print (**figuur 5**). De print-layout (PDF) en een Target3001!-project kunnen worden gedownload van de projectpagina [2]. De zekering/weerstand R1 mag een waarde tussen 47 Ω en 100 Ω hebben. De condensatoren C1, C2 en C3 moeten X-gecertificeerde typen zijn (X1 of X2). Deze condensatoren zijn geschikt voor netspanning. De overige componenten zijn niet kritisch. De bruggelijkrichter hoeft niet per se geschikt te zijn voor netspanning. U kunt een 12V- of 24V-relais gebruiken, maar de waarden van de condensatoren C2 en C3 moeten wel passen bij de spoelweerstand. Als een 24V-relais wordt gebruikt, mogen de waarden van C2 en C3 worden gehalveerd, wat ook weer kosten spaart. ◀

vertaling: Evelien Snel — 240090-03

Over de auteur

Frank Bachmann was al als kind geïnteresseerd in elektronica. Na zijn leertijd als elektrotechnicus ging hij werken bij een elektronicafabrikant en behaalde hij zijn diploma's als elektronicus. Hij ging van de productie naar de ontwikkeling en werd uiteindelijk ontwikkelingsmanager bij diverse bedrijven. In die tijd ontwikkelde hij hardware- en softwareoplossingen voor besturingsapparaten met reactieve vermogenscompensatie, vermogensmeter en schakelende apparaten voor vermogenscondensatoren op basis van thyristoren. Frank Bachmann geniet nu van zijn pensioen op het eiland Rügen.

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via wanderlumi33@yahoo.de of naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.



Gerelateerd product

> ZOYI ZT-703S (3-in-1)
2-ch Oscilloscope (50 MHz) +
Multimeter + Signal Generator
www.elektor.nl/20963



FOCUS THEMA

Bezoek onze **Energie & vermogen** themapagina voor meer artikelen, projecten, nieuws en video's.

www.elektormagazine.nl/energie-vermogen



WEBLINKS

[1] MultiSim: <https://www.multisim.com/>

[2] Projectpagina inclusief print-layout: <https://www.elektormagazine.nl/240090-03>

Verbetering van de ET5410A+ DC-belasting

blijf koel en stil



Figuur 1. De ET5410A+.

Jean-François Simon (Elektor)

De ET5410A+ is een betaalbare DC-belasting, maar de ventilator is erg luidruchtig. Laten we hem stiller maken bij lichte belasting en beter laten presteren bij vol vermogen.

Als u een DC-belasting wilt toevoegen aan uw lab om voedingen te testen of de ontlading van accu's te bestuderen, zijn er maar weinig betaalbare opties. Ik heb gekozen voor de ET5410A+ (figuur 1), verkocht onder de merknamen East Tester en Mustool. Ik maakte gebruik van een tijdelijke aanbieding om hem voor € 162 te kopen. Afgezien van de Kunkin KP184 met identieke specificaties (150 V/40 A) en een relatief vergelijkbare prijs, zijn de andere goedkopere opties bijna twee keer zo duur, zoals de KEL103 van Korad die voor ongeveer € 330 te koop is. Over het algemeen doet het apparaat zijn werk, maar de koelventilator is bijzonder luidruchtig.

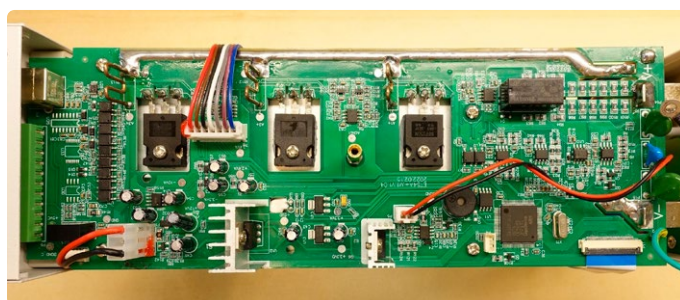
Een zeer luidruchtige ventilator

Zonder belasting, of bij geringe dissipatie, heb ik een geluidsniveau van 50 dBa gemeten, hoewel mijn laboratorium vrij stil is (32 dBa omgeving). Laten we eens kijken of het mogelijk is om het geluidsniveau te reduceren zonder dat dit ten koste gaat van de prestaties. Metingen hebben aangetoond dat het toerental van de ventilator in drie stappen wordt geregeld door de primaire microcontroller van het instrument als functie van het vermogen dat wordt gedissipeerd in de belasting. De temperatuursensor (RT1) op het koellichaam wordt daarom alleen gebruikt als veiligheidsvoorziening en niet direct voor de regeling. Het toerental van de ventilator is het laagst tussen 0 en 125 W gedissipeerd vermogen; daarna neemt het toerental toe naar gemiddeld tot 305 W en bereikt uiteindelijk zijn maximum tussen 305 W en 400 W. Details over het toerental, ventilatorspanning en geluidsniveau staan in tabel 1.

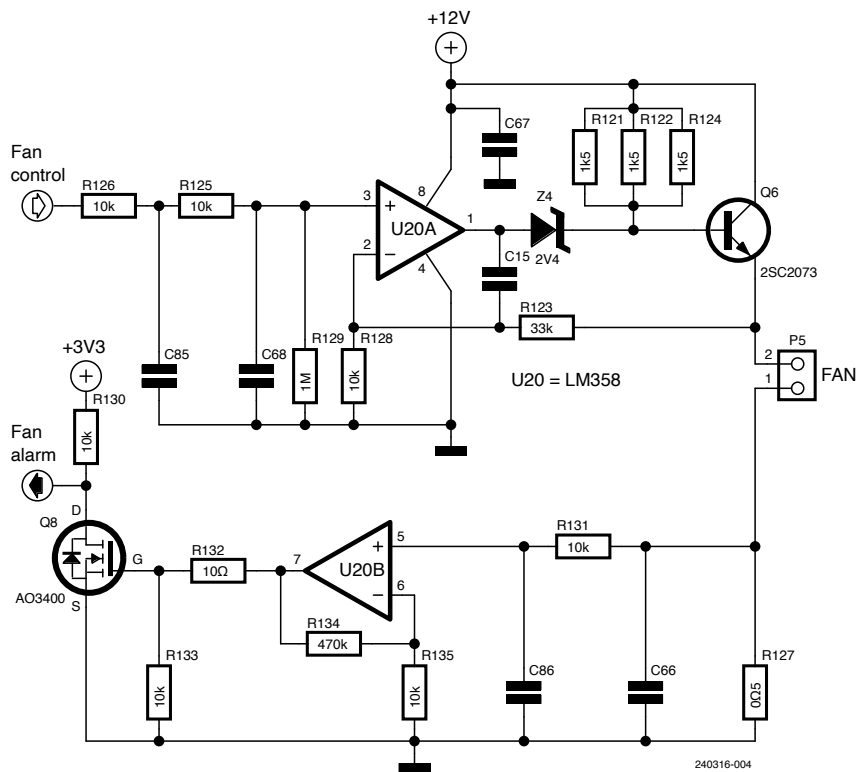
Het is duidelijk dat, naast het relatief hoge toerental 1, de toerentallen 2 en 3 erg dicht bij elkaar liggen. Bij toerental 3, dat het maximum zou moeten zijn, wordt de ventilator niet met 12 V gevoed, in tegenstelling tot wat zou kunnen worden verwacht. Laten we eens kijken of we de ventilatorspanning bij toerental 1 kunnen verlagen en bij toerental 3 kunnen verhogen.

Tabel 1. Vóór de wijzigingen.

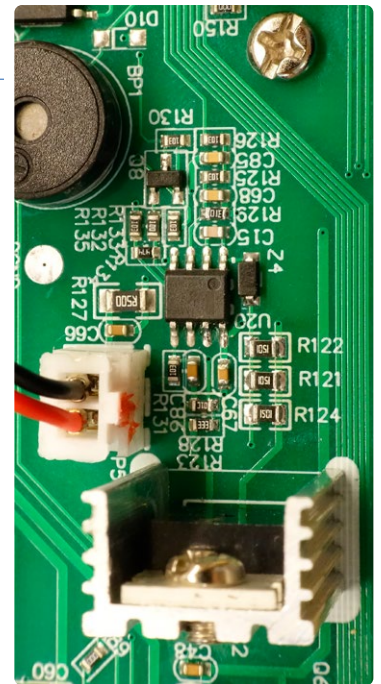
Snelheid	Ventilatorspanning (V)	Ventilator-toerental (RPM)	Geluid (dBa)
1 - langzaam	5,6	2660	50
2 - gemiddeld	9,6	3940	59
3 - snel	9,9	4040	59



Figuur 2. De hoofdprint.



Figuur 3. Schema van de ventilatorregeling.



Figuur 4. De oorspronkelijke ventilatorregeling.

Het regelcircuit

De hoofdprint, die drie van de zes IRFP250N MOSFET's van het instrument bevat, is afgebeeld in **figuur 2**. De andere drie bevinden zich op een secundaire print aan de andere kant van het koelblok. De analyse van de ventilator-regelschakeling is sterk vereenvoudigd door het opmerkelijke werk van forumgebruiker 'morris6', die de moeite nam om het volledige schema van het apparaat te achterhalen [1]. Het gedeeltelijke schema van de ventilatorregeling is te zien in **figuur 3**; zie het bijbehorende printgedeelte in **figuur 4**. De microcontroller verzendt het ingestelde toerental als een PWM-signaal met een frequentie van 5,45 kHz. Het signaal wordt omgezet in een gelijkspanning door de dubbele laagdoorlaatfilters R126/C85 en R125/C68 en aangelegd op de niet-inverterende ingang van opamp U20A. Deze is geconfigureerd als spanningsregelaar en zijn output regelt de basis van de bipolaire transistor Q6, die op zijn beurt op de positieve rail aangesloten is en die de ventilator voedt. De outputspanning op de emitter van Q6 wordt gedeeld door de spanningsdeler R123/R128 om te dienen als negatieve terugkoppeling naar de opamp. Zo komt elke toerentalinstelling 1, 2, 3 overeen met een gelijkspanning op pin 3 van U20 (respectievelijk 1,27 V, 2,23 V en 3,05 V) en dus met een andere outputspanning die de ventilator voedt.

Sommige elementen in het ontwerp zijn opvallend:

- De algemene architectuur, die een lineaire regelaar voorstelt. In dit ontwerp verspilt de regeltransistor enig vermogen als warmte, vooral bij een lage ventilatorsnelheid. Het zou efficiënter zijn geweest om de positieve klem van de ventilator aan te sluiten op +12 V en de negatieve klem naar massa te schakelen met behulp van PWM en een N-kanaals MOSFET. Het is moeilijk om deze keuze te verklaren, behalve misschien de angst van de ontwerper om in het laatste geval mogelijk meer elektromagnetische interferentie te genereren.
- Het gebruik van een NPN-transistor op de positieve rail, aange-

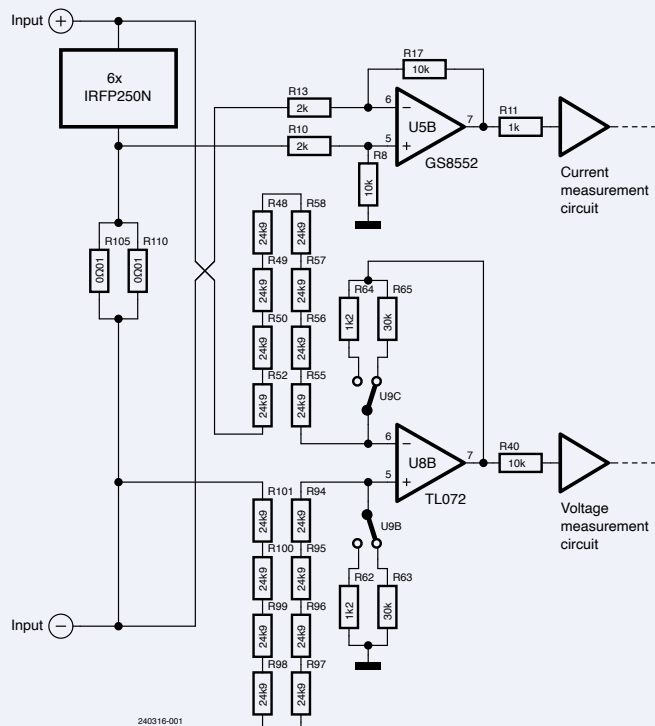
stuurd door een opamp met dezelfde spanning (12 V) als de collectorspanning. Enerzijds heeft de LM358 geen rail-to-rail output en anderzijds kan de transistor bij afwezigheid van een hogere basisspanning nooit volledig in verzadiging komen, wat verklaart waarom de ventilator maximaal ongeveer 9,8 V ontvangt in plaats van de verwachte 11,8 V (12 V min ongeveer 0,2 V collector/emitter-spanning wanneer Q6 verzadigd is).

- De drie basis pull-up weerstanden, in een poging om het vorige punt te compenseren. Deze zorgen voor een vrij hoge basisstroom, zodat de opamp alleen in sink-modus werkt om deze te regelen. Als ze worden verwijderd, kan de spanning die aan de ventilator wordt geleverd niet hoger zijn dan 8,6 V en kunnen de toerentallen 2 en 3 niet worden bereikt.
- De zenerdiode tussen de output van de opamp en de basis van Q6. Het enige effect hiervan is dat de laagste snelheid iets hoger wordt, omdat de opamp bij deze snelheid zijn maximale stroom (ongeveer 10 mA) vermindert om te proberen de basisstroom, die hard wordt aangestuurd door de drie pull-up weerstanden, te verlagen. Bij dit niveau van stroomafname is de LM358 niet in staat om een voldoende lage outputspanning te handhaven. De basisspanning van Q6 (gelijk aan de outputspanning van de opamp plus de zenerspanning) is dus te hoog, waardoor de regelaar niet meer goed regelt. De spanningen op pinnen 2 en 3 van U20 zijn niet langer gelijk en de outputspanning is hoger dan gepland. Door de zenerdiode kort te sluiten wordt de regeling hersteld en daalt de ventilatorspanning naar 5,4 V in plaats van 5,6 V.

De rest van de schakeling wordt gebruikt om te controleren of de ventilator draait, door het stroomverbruik te meten via de R127-meetshunt. De gemeten spanning wordt versterkt door de andere helft van U20, geconfigureerd als een eenvoudige niet-inverterende versterker met een versterking van 48 maal. Als de ventilator losgekoppeld is of niet

Hogere spanningen en stromen simuleren

Om te bepalen of de ventilator wordt aangestuurd op basis van de werkelijke temperatuur of vermogensdissipatie, was het wenselijk om deze twee parameters onafhankelijk van elkaar te kunnen variëren. Hier is een methode om hoge spanningen en stromen te simuleren zonder echt vermogen te dissiperen (om de temperatuur niet te laten variëren).



De ET5410A+ meet de stroom met behulp van een shunt van 5 mΩ (twee shunts van 10 mΩ parallel) aan de negatieve kant van zijn ingang, zoals te zien is op het deelschema hierboven. Deze meting wordt versterkt door een verschilversterker met een versterking van 5, gebouwd rond de ene helft van de opamp U5, waarna het signaal via weerstand R11 naar de ingang van de volgende trap gaat. Door deze SMD-weerstand te desolderen en daar een spanning te injecteren met behulp van een labvoeding en een andere tijdelijke weerstand, is het mogelijk om een stroom van 0 tot 40 A te simuleren door een spanning van 0 tot 1 V te injecteren. Een vergelijkbare methode wordt gebruikt om hoge spanningen te simuleren. Dit maakt het mogelijk om de schakeling veilig te bestuderen; ik heb in ieder geval geen 150V-DC-voeding. De spanning op de ingangsklemmen wordt gemeten door de verschilversterker die is gemaakt met de ene helft van de opamp U8 en de bijbehorende weerstanden. Deze keer is de versterking minder dan 1; de schakeling deelt deingangsspanning door ongeveer 49,6 of 6,6 afhankelijk van het bereik, dat door de microcontroller wordt gekozen via relais U9. De 199,2kΩ-ingangsweerstanden zijn opgebouwd uit weerstandsnetwerk die elk bestaan uit acht 24,9kΩ-weerstanden in serie. Door zeven van deze acht weerstanden te shunten met kleine tijdelijke draden op elke ingang, kunnen we de versterking kunstmatig vermenigvuldigen met 8. Op deze manier kan een ingangsspanning van 0 tot 150 V worden gesimuleerd met een echte spanning van 0 tot 18,75 V.

goed functioneert en minder dan ongeveer 45 mA stroom trekt, daalt de uitgangsspanning van U20B onder de drempelspanning $V_{GS(th)}$ van MOSFET Q8. De MOSFET stopt met geleiden en de alarmuitgang wordt hoog.

Een paar aanpassingen

De ventilator vervangen om het geluid te verminderen zou een oplossing kunnen zijn, maar in dit specifieke geval is de demontage ervan niet erg eenvoudig. Bovendien zijn in de handel verkrijgbare ventilatoren met zowel een laag geluidsniveau als een goede statische druk, om de luchtstroombeperking van het koellichaam te overwinnen, moeilijk te vinden. Tot slot zou dit het probleem van de afstand tussen de toerentallen 2 en 3 niet oplossen.

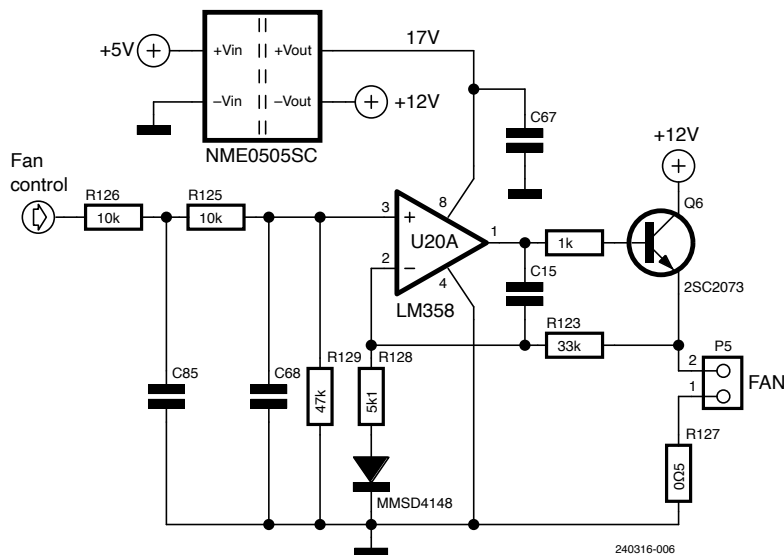
Om toerental 1 te verlagen kan het verleidelijk zijn om de waarden van de weerstandsdeler R123/R128 aan te passen. Het probleem met deze aanpak is dat de ventilatorspanning bij toerental 3 ook met dezelfde factor wordt verlaagd. Het is noodzakelijk om een niet-lineariteit te introduceren om toerental 1 te verlagen zonder invloed te hebben op toerental 3. Hiertoe stel ik voor om een 1N4148-diode in doorlaatrichting (hier in SMD-uitvoering, MMSD4148) toe te voegen tussen weerstand R128 en massa, die een offset van ongeveer 0,5 V (dat is de de voorwaartse spanning van deze diode bij een zeer lage stroom) toevoegt aan de spanning die wordt gezien door de inverterende ingang van U20A. In de praktijk installeerde ik de weerstand R128 en de diode verticaal op de pads die in eerste instantie voor R128 bestemd waren. Naast deze diode kunnen we, om de gewenste spanningen en toerentallen te krijgen, spelen met de waarden van R123, R128 en R129. Deze waarden zijn proefondervindelijk bepaald met behulp van een Excel-sheet; een oneindig aantal combinaties is mogelijk, waarbij de moeilijkheid is om waarden te vinden die binnen de E12- of E24-reeks vallen. De volgende waarden worden voorgesteld:

R123 = 33 kΩ (geen verandering)

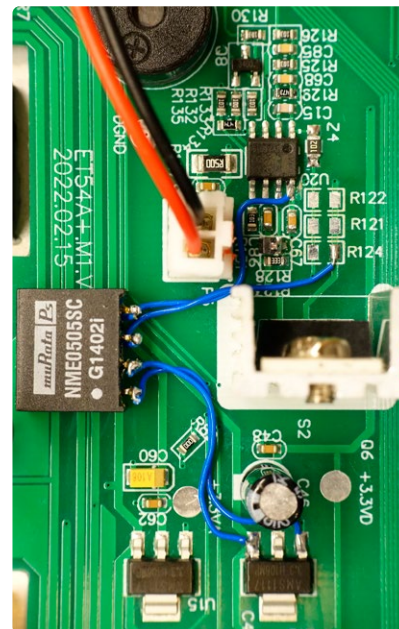
R128 = 5,1 kΩ

R129 = 47 kΩ

Om toerental 3 te verhogen is het nodig om Q6 in verzadiging te brengen. Hiertoe wordt de voeding van U20 verhoogd naar 17 V met behulp van een kleine geïsoleerde DC/DC-module (Murata NME0505SC of vergelijkbaar), waarvan de ingang wordt aangesloten op de bestaande 5V-rail en waarvan de uitgang in serie wordt geschakeld met de bestaande 12V-rail. De 12V-voeding wordt oorspronkelijk naar U20 gebracht via een heel kort printspoor van een nabijgelegen via, vlakbij pin 8; deze baan hoeft u alleen maar te onderbreken en een klein draadje aan pin 8 te solderen om de nieuwe voeding aan te brengen. Hierna worden de pull-up weerstanden R121, R122, R124 en zenerdiode Z4 verwijderd. Er is echter nog een weerstand nodig om de basisstroom van Q6 te beperken wanneer deze verzadigd raakt bij een maximale toerental. Een waarde van 1 kΩ is geschikt; deze kan op de plaats van Z4 worden gesoldeerd. De gewijzigde schakeling is weergegeven in **figuur 5** en **figuur 6**. De zo verkregen spanningen en snelheden staan in tabel 2. Bij mijn eigen ET5410A+ is de 12V-voeding aan de lage kant (11,6 V), wat de spanning verklaart die wordt waargenomen bij ventilator toerental 3, wanneer Q6 volledig verzadigd is ($V_{CE(sat)}$ rond 0,2 V).



Figuur 5. Het aangepaste schema.



Figuur 6. De aangepaste print.

Tabel 2. Na de wijzigingen.

Snelheid	Ventilatorspanning (V)	Ventilator-toerental (RPM)	Geluid (dBa)
1 - langzaam	3,8	1860	42
2 - gemiddeld	8,6	3620	55
3 - snel	11,4	4390	60

Testen

Na deze aanpassingen, waarbij het laagste toerental van de ventilator werd verlaagd, moest de temperatuurstijging van het koellichaam worden gecontroleerd. Er werd gedurende langere tijd een continu vermogen van 125 W gedissipeerd in de DC-belasting en de temperatuur van het koellichaam werd gemeten met een thermokoppel van het K-type. Deze bereikte ongeveer 45 °C na ongeveer 20 minuten. De microcontroller besloot toen dat er extra koeling nodig was, met behulp van de ingebouwde temperatuursensor. De ventilator werd een paar minuten op volle kracht aangedreven en daarna teruggebracht naar toerental 1. Tests op hogere vermogensniveaus vertoonden een vergelijkbaar gedrag, zonder bijzondere problemen.

Toekomstige verbeteringen?

De doelen zijn dus bereikt: bij lage vermogensniveaus is het apparaat veel minder luidruchtig en wanneer het gedissipeerde vermogen of de duur van de test toeneemt, neemt de regeling het over om voor een goede koeling te zorgen. Het bedieningscomfort is aanzienlijk toegenomen. Natuurlijk had dit op veel andere manieren aangepakt kunnen worden: een microcontroller toevoegen om de snelheden op een aangepaste manier via software te regelen; Q6 vervangen door een N-kanaal FET, enzovoort. Het zou ook mogelijk zijn om een specifiek IC voor de ventilatorregeling te gebruiken, zoals de TC642/647/648 van Microchip of de EMC2301. Al deze oplossingen zouden uitgebreidere modificaties aan de bestaande print nodig hebben gemaakt of de toevoeging van een nieuwe print, wat ik wilde vermijden.

Deze DC-belasting is natuurlijk niet perfect, maar voor incidentele toepassingen voldoet hij, en dat bij een acceptabele prijs. Voor het automatiseren van metingen en het loggen van waarden op de PC laat de officiële software van de fabrikant te wensen over, maar de ET5410A+ is compatibel met een zeer ambitieus softwareproject genaamd Test Controller [2], dat veel ruimte biedt voor experimenten. Een mogelijke volgende aanpassing of verbetering van het apparaat

zou bijvoorbeeld het toevoegen van een remote sense-mogelijkheid kunnen zijn, om de spanningsval te compenseren die optreedt in de kabels wanneer de belasting wordt gebruikt bij grote stromen. ◀

vertaling: Hans Adams — 240316-03

Vragen of opmerkingen?

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



Over de auteur

Jean-François Simon heeft al heel lang een passie voor elektronica en houdt van uiteenlopende onderwerpen als schema-ontwerp, testen en meten, prototypen, experimenteren met SDR's en nog veel meer. Hij houdt ervan om zijn gereedschap en andere systemen te maken, aan te passen en te verbeteren. Hij heeft een technische achtergrond en houdt ook van mechanica, machinale bewerking en alles wat met techniek te maken heeft. Jean-François is sinds 2023 werkzaam bij het Lab- en Contentteam van Elektor.



Gerelateerde producten

- > **Siglent SDL1020X-E Programmable DC Electronic Load (200 W)**
www.elektor.nl/19254
- > **JOY-iT HD35 USB Load Resistor (35 W)**
www.elektor.nl/19164

WEB LINKS

- [1] Schema ET5410A+: <https://tinyurl.com/et5411a>
- [2] Test Controller-software:
<https://lygte-info.dk/project/TestControllerIntro%20UK.html>

electronica 2024 een terugblik

Met meer dan 3400 exposanten in alle 18 hallen van de beurs in München had electronica 2024 (12...15 november 2024) meer te tonen dan ooit in haar 60-jarige geschiedenis. Messe München en Elektor sloegen opnieuw de handen ineen voor de Fast-Forward Startup Award, maar dat was niet het enige wat er zich rond de Elektor-stand afspeelde. Vier videocontentmakers (met meer dan twee miljoen volgers) presenteerden hun nieuwste elektronica-projecten. Elektor-redacteuren interviewden experts op het podium en praatten over de nieuwste ontwikkelingen in onze dagelijkse Lab Talk-livestream. En natuurlijk maakten Elektor- en eeNews Europe-journalisten van de gelegenheid gebruik om op zoek te gaan naar interessante nieuwtjes. Hieronder volgt slechts een kleine selectie van de vele technologieën die werden gepresenteerd aan de meer dan 80.000 bezoekers van het evenement. U vindt nog meer op ons YouTube-kanaal www.youtube.com/ElektorIM.



Livestreams van de tentoonstelling

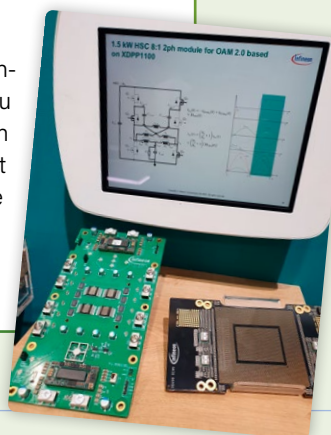
Voor het eerst produceerde Elektor dagelijks Lab Talk-livestreams vanaf de beursvloer. Elektor-redacteur Brian Tristram Williams werd bijgestaan MET bijdragen van Elektor-auteur Stuart Cording, Jean-Pierre Joosting van eeNews Europe en Elektor-hoofdredacteur Jens Nickel. Onder onze gasten bevonden zich de influencers GreatScott!, Max Imagination, DIY Guy Chris, Edi's Techlab, Alix Paultre van ElectronicDesign, Natasha Baker van SnapMagic en anderen. Maar dat was nog niet alles. Tijdens onze 'The Future Is Now'-sessies stonden verschillende experts op het podium om live presentaties te geven. Zo gaf de bekende leraar Peter Dalmaris, auteur van het boek KiCad Like a Pro, een live tutorial over KiCad 8.



Hebt u de livestreams gemist?
U kunt de video's bekijken op
www.elektormagazine.com/electronica-2024!

Voeding - daar gaat het om

Het spreekt voor zich dat we veel AI-toepassingen hebben gezien tijdens electronica. Zoals u weet, hebben alle spannende AI-toepassingen ook veel vermogen nodig. En deze stroom moet naar de (gigantische) chips worden geleid die het werk 'in the cloud' doen. Infineon toonde zo'n voedingsoplossing.
<https://tinyurl.com/infineon-we-power-ai>





electronica Fast Forward Start-Up Award

In de zesde editie van ons start-up evenement, electronica Fast Forward 2024, dat werd georganiseerd door Messe München en Elektor, streden vier start-ups om wereldwijde bekendheid en een deel van een groot marketingbudget. Op 's werelds toonaangevende elektronica-beurs kon de Elektor-jury het na de korte presentaties van de kandidaten maar moeilijk eens worden over de winnaars. De jury heeft de start-ups beoordeeld op criteria als technische verdienste, belang voor de industrie, uitstekende algemene presentatie en potentieel voor toekomstige ontwikkeling. Onze gelukwensen aan de winnaars!

1^o PRIJS

(marketingpakket van Elektor ter waarde van € 50.000 plus gratis stand op de volgende electronica 2026):

SpeedPox

2^o PRIJS

(marketingpakket van Elektor ter waarde van € 25.000):

BTRY

3^o PRIJS

(marketingpakket van Elektor ter waarde van € 10.000):

ICECAP

ETHICS IN ELECTRONICS AWARD

(marketingpakket van Elektor ter waarde van € 5.000 plus ethisch profiel in 'Ethiek in Elektronica'):

Banyan.eco

SpeedPox behaalde de eerste plaats voor hun snel uithardende epoxyharsen. BTRY en Icecap behaalden respectievelijk de tweede en derde prijs voor hun doorbraken op het gebied van ultrasnel oplaadbare accu's en draagbare thermo-elektrische koeling, terwijl Banyan.eco de Ethics in Electronics Award ontving voor hun AI-gestuurde CO₂-footprint-platform. Deze startups benadrukken de rol van het evenement in het stimuleren van duurzame en transformatieve ontwikkelingen in de elektronica.

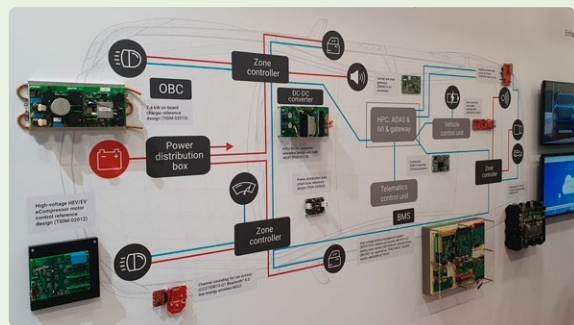
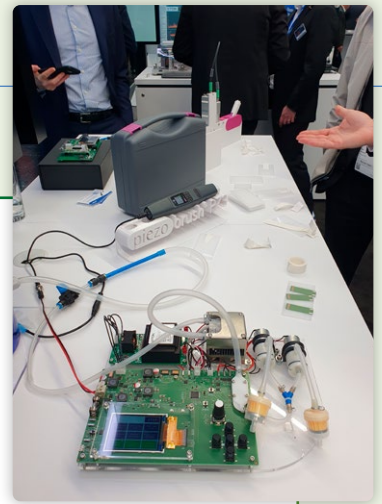
Meer informatie over de start-ups:

<https://tinyurl.com/eff2024-winners>

Oppervlakken reinigen

De PiezoBrush PZ3 van relyon/TDK werkt met een plasmastraal en reinigt oppervlakken maximaal. Na het behandelen van een plastic oppervlak kon een plakband worden aangebracht dat zo sterk hechtte was dat het op geen enkele manier kon worden verwijderd zonder het volledig te vernietigen. Een verbazingwekkende demo – we hopen dat het niet in magazijnen wordt gebruikt voor prijskaartjes!

www.relyon-plasma.com/piezobrush-pz3/



Automotive (natuurlijk!)

Onder invloed van de huidige marktverschuivingen (zoals elektrische aandrijving en autonoom rijden) waren auto-gerelateerde technologieën en oplossingen goed vertegenwoordigd op de stands van de halfgeleiderfabrikanten. Dit is wat ST en TI te tonen hadden.

<https://tinyurl.com/ST-electronica-2024>

<https://tinyurl.com/hev-ev-powertrain>





Robots

Een van de aardigste demo's was te zien op de stand van electronica Fast Forward en Elektor. Unitree en MyBotShop toonden niet alleen vierpotige robo-honden, maar ook exemplaren op wielen en zelfs humanoïden. De humanoïde man wordt verkocht aan universiteiten en andere onderzoeksinstituten om toepassingen te ontwikkelen. Zijn prijskaartje is ongeveer € 85.000, maar we zijn er zeker van dat dit nog maar het begin is.

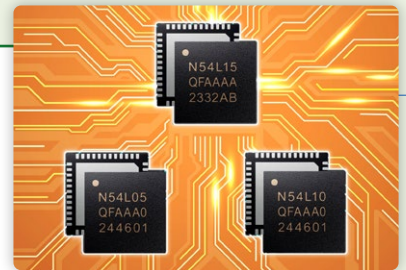
www.unitree.com

www.mybotshop.de

Draadloze SoC's

De nRF54L-serie draadloze SoC's van Nordic Semiconductor – waaronder de nRF54L15, nRF54L10 en nRF54L05 – biedt superieure prestaties, uitzonderlijke verwerkingskracht en veelzijdige ontwerpopties voor IoT-toepassingen. Deze componenten integreren een 2,4GHz-radiomodule en een MCU-functie in één ultra-low-power chip. De nRF54L15 is bedoeld voor veeleisende toepassingen, terwijl de nRF54L10 en nRF54L05 gericht zijn op toepassingen met hoge volumes. De nRF54L-serie ondersteunt meerdere protocollen, waaronder Bluetooth LE, Thread en Zigbee, met uitgebreide mogelijkheden.

<https://tinyurl.com/device-nrf54l>



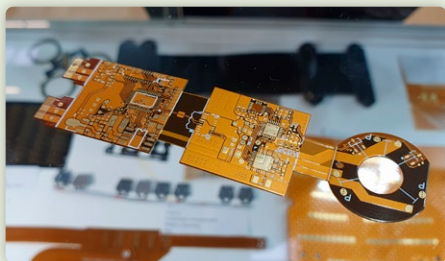
Influencer-forums

electronica 2024 was een grote tentoonstelling inclusief een uitgebreid ondersteunend programma met praktische forums, conferenties en speciale evenementen. Op zes podia vonden discussies plaats over verschillende onderwerpen, waaronder automotive, embedded systemen, IIoT, vermogenselektronica en AI-gestuurd machine learning. Een van de belangrijkste podia was de Visionary Stage in Hal B4, in de buurt van het Fast Forward-gebied en de Elektor-stand. Elektor droeg bij aan dit podium door het hosten van forums zoals The Smart Influencer Marketing Forum en The Student & Influencer Marketing Forum. Deze forums op electronica 2024 boden deelnemers, met name studenten en marketingprofessionals, nuttig advies en inspiratie om te innoveren en op zinvolle manieren met elkaar in contact te komen.

Het Smart Influencer Marketing Forum (dag 3 van electronica 2024) onderzocht hoe men slimme influencer-marketing kan inzetten

voor een bedrijf. Panelleden waren onder andere top-influencers GreatScott!, Max Imagination, DIY Guy Chris en Simon Gao (PCBWay), alsmede Brian Tristram Williams van Elektor. Samen bespraken ze strategieën voor hun gecombineerde publiek van meer dan 2 miljoen volgers om in contact te komen met engineers, hobbyisten en makers.

Het Student & Influencer Marketing Forum (dag 4 van electronica 2024) was bedoeld om studenten te inspireren die de elektronica-industrie in willen. De sessie werd bijgewoond door top-influencers uit de elektronicasector en Elektor-redacteuren, die strategieën deelden voor het creëren van content in de branche. Het evenement benadrukte hoe studenten technische expertise kunnen combineren met creatieve verhalen om uit te blinken in de branche.



Lichtgewicht oplossingen

Deze printen zijn niet flexibel en daardoor geschikt voor apparaten met beperkte ruimte. Flexibele PCB's kunnen ook heel licht worden gemaakt, met vreemde toepassingen zoals bevestiging aan insecten. PCBWay toonde deze en vele andere (deels zeer kleurrijke oplossingen) uit hun portfolio.

<https://tinyurl.com/PCBWay-electronica-2024>

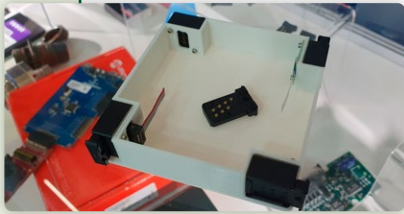


Robuuste geheugenstick

Tot 100.000 insteekcycli en waterdicht! Voor ruwe omgevingen hebt u robuustere oplossingen nodig dan gepruts met SD-kaarten of USB-sticks. De Datakey Minibar (met SPI- of I2C-interface) is voornamelijk bedoeld voor het hosten van crypto-sleutels. De connector kan (bijvoorbeeld) in de hoek van

het apparaat worden geplaatst.

<https://tinyurl.com/datakey-minibar>



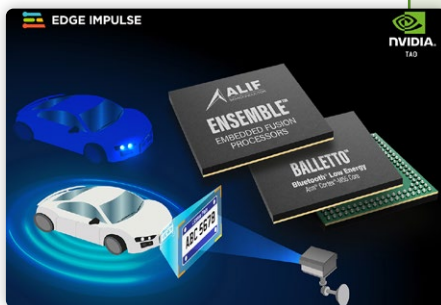
AI-visie op edge-MCU's

Alif Semiconductor en Edge Impulse hebben een belangrijke doorbraak aangekondigd in de implementatie van AI vision processing

op edge-microcontrollers door de introductie van volledige ondersteuning voor de Nvidia TAO model training-toolkit op de Ensemble en Balletto MCU-families van Alif en het Edge Impulse-platform. Embedded ontwikkelaars die AI vision-toepassingen willen implementeren – zoals het tellen van mensen, inbraakdetectie of robotica – kunnen nu gebruikmaken van de TAO training-toolkit en de bijbehorende dataset, waarbij ze met een gerust hart een vooraf getraind TAO-model kunnen inzetten of een aangepast model dat is ontwikkeld door middel van transfer learning via Edge Impulse op Alif Ensemble of Balletto MCU's.

www.alifsemi.com

www.edgeimpulse.com



Drievoudige radio-ondersteuning

Ignion heeft een unieke drie-poorts virtuele antenne-component aangekondigd met gelijktijdige drievoudige radio-ontvangst voor cellulair, GNSS en WiFi/BLE. De passieve SMT-component, OMNIA mXTEND genaamd, verandert het massavlak van een print in een hoog-efficiënt stralingselement dat kan werken tussen 400 MHz en 8.000 MHz, waardoor fabrikanten van apparaten specifieke radiobanden kunnen kiezen zonder de afmetingen te moeten aanpassen. Vergeleken met drie onafhankelijke antennes biedt OMNIA mXTEND extra vrijheidsgraden, omdat er maar één vrij printgebied nodig is en tegelijkertijd superieure verbindingsprestaties over lange afstanden mogelijk zijn voor meerdere frequenties. Het geavanceerde ontwerp met meerdere blokken minimaliseert radio-inkoppeling, verbetert de prestaties, verlaagt de BoM van het aanpassingsnetwerk en vergemakkelijkt certificeringen – een cruciale factor voor IoT-apparaten waar elke dB telt.

www.ignion.io/landing-page/discover-omnia-mxtend



GreatScott!, DIY Guy Chris en Max Imagination

Elektor werkt al heel lang samen met getalenteerde influencers die artikelen hebben geschreven en hebben deelgenomen aan eerdere evenementen. Dit jaar hebben we een aantal van hen uitgenodigd om deel te nemen aan het programma van electronica 2024 en hun expertise en creativiteit naar de beurs te brengen.

Max Imagination, de populaire innovator op het gebied van elektronica en content creator met meer dan 145.000 YouTube-abonnees, wist het electronica 2024-publiek de hele week te boeien met zijn live demo's. Een hoogtepunt was zijn FPV head tracker, die hij in minder dan een uur live in elkaar zette! Terwijl hij op de stand was, werkte hij aan een nieuwe robot, wat gesprekken op gang bracht over zijn creatieve proces. Bekijk zijn FPV head tracker hier: <https://youtu.be/Mt4MBWvempl>

GreatScott! deelde zijn expertise met deelnemers over de DIY LiPo Supercharger Kit. Tijdens een livestream besprak hij zijn innovatieve projecten, zijn reis als content creator en DIY elektronica. En tijdens Elektor Lab Talk #24 sprak GreatScott! over nieuwe technologieën en het evenement electronica 2024. www.youtube.com/live/mOpgzH0GVWI

DIY Guy Chris hield een live soldeerwedstrijd en boeiende discussies, waarbij hij op de stand vragen beantwoordde van engineers en makers. Via zijn zeer gewaardeerde video's en projecten, waarin hij geavanceerde elektronica vereenvoudigt door middel van stap-voor-stap handleidingen over onderwerpen zoals LED-displays en CNC-machines, toonde Chris creaties zoals de RGB LED Cube en nam hij deel aan Elektor Lab Talk om inzicht achter de schermen van zijn werk te geven. www.youtube.com/live/yCYrELoGjhs

Tijdens het evenement gonsde het van de activiteiten op de Elektor-stand, waar deze influencers in gesprek gingen met fans, kennis deelden en hun projecten demonstreerden, wat een onvergetelijke ervaring opleverde voor bezoekers.

240678-03



Elektromagnetische compatibiliteit

EMC in een notendop!

Dr. Heinz Zenkner (Würth Elektronik eiSos)

EMC betreft het zodanig ontwerpen van elektronische producten en systemen dat de emissie van elektromagnetische straling wordt geminimaliseerd en dat ze ongevoelig zijn voor interferentie van elektromagnetische velden van andere bronnen. Dat is wat men altijd hoort. Dat is wat men altijd leest. Is dat werkelijk zo?

Ja en nee, het hangt ervan af hoe men het bekijkt, en het is maar de halve waarheid. Autoriteiten richten zich voornamelijk op de storingsemissie om te voldoen aan de bescherming van radio's. Standaarden kijken naar de interfaces, het gaat om gestandaardiseerde procedures waarmee zowel de storingsemissie als de storingssimmunitieit van het apparaat worden getest. Maar hoe ziet de situatie in het apparaat zelf eruit? We weten immers uit

de geneeskunde dat symptoombestrijding niet de oplossing is voor het onderliggende probleem.

Dit korte artikel wil laten zien waar en hoe de oorzaken van 'EMC-problemen' ontstaan en welke maatregelen kunnen worden getroffen.

Oorzaken van EMC

Wanneer er een elektrische stroom door een draad loopt, ontstaat er een magnetisch

veld rond de draad. Dit breidt zich uit en vormt een magnetisch veld dat meestal concentrisch rond de draad loopt. De sterkte van het magnetische veld hangt af van de stroom in de draad. Als de stroom in de draad verandert, verandert ook het magnetische veld rond de draad. Dit komt doordat de beweging van de ladingsdragers (meestal elektronen) in de draad verandert als de stroomsterkte verandert. Deze verandering in het magnetische veld induceert een elektrisch veld volgens de vergelijkingen van Maxwell. De resulterende elektromagnetische straling ontstaat wanneer deze veranderende elektrische en magnetische velden zich door de ruimte voortplanten. In een typische schakeling met wisselstroom verandert de richting van de stroom periodiek, wat leidt tot een periodieke verandering in het magnetische veld en dus tot een periodieke opwekking van elektromagnetische golven. Deze elektromagnetische golven kunnen zich door de ruimte voortplanten en andere elektrische of elektronische schakelingen beïnvloeden. Dit mechanisme, ook bekend als elektromagnetische koppeling, vindt plaats op een print tussen geïntegreerde schakelingen (IC's) en printbanen als gevolg van verschillende effecten:

➤ **Stroom door de geleiders:** wanneer elektrische signalen door printspoor-

ren lopen, genereren ze magnetische velden rond deze. Dit gebeurt wanneer signalen worden verzonden tussen de IC's en andere componenten op de print.

- **Signaalveranderingen en schakelprocessen in de IC's:** wanneer digitale signalen worden verwerkt, wordt er voortdurend geschakeld in de IC's. Deze schakelprocessen veroorzaken veranderende elektrische velden binnen die IC's, die op hun beurt leiden tot veranderende magnetische velden.
- **Signaalreflecties en impedantie-aanpassing:** signaalreflecties kunnen optreden wanneer een signaal de grens tussen verschillende materialen met verschillende impedantie passeert. Deze reflecties kunnen ervoor zorgen dat signalen heen en weer bewegen langs de geleidende paden, wat op zijn beurt kan leiden tot meer elektromagnetische straling.
- **Capacitieve en inductieve koppeling:** capacitieve en inductieve koppelingseffecten kunnen optreden op een print, waar elektrische of magnetische velden worden gesuperponeerd tussen de printsporen en de IC's. Dit kan interferentie veroorzaken tussen de verschillende signalen.

Zoals hierboven beschreven, 'reist' de elektromagnetische energie, dat wil zeggen de storing, van de bron naar de interfaces van een apparaat en daarvanuit, via openingen in behuizingen en kabelverbindingen, naar de 'omgeving'.

Op weg van de storingsbron, bijvoorbeeld een Ethernetcontroller, naar de storingsont-

vanger, bijvoorbeeld de Ethernetkabel, kan het stoorsignaal verschillende problemen veroorzaken:

- Koppeling van de interferentie in naburige schakelingen op de elektronische module en het genereren van problemen met de signaalintegriteit en dus interferentie, met mogelijk sporadische uitval van functies.
- Emissie van de interferentie als een differential mode (DM) interferentiesignaal van de interferentiebron en ontkoppeling als een common mode (CM) interferentiesignaal via openingen in de behuizing.
- Uitzending van het stoorsignaal via de ethernetkabel in de vorm van een elektromagnetische golf (radiostoring).
- Het genereren van geleide interferentie op de Ethernetkabel en het beïnvloeden van het Ethernet-signaal, wat kan leiden tot een hoge bit error rate (BER).

In de EMC-context worden de termen 'ongewenste emissie' en 'immuñiteit' vaak gebruikt om twee verschillende aspecten te beschrijven die niettemin op een vergelijkbare manier verband houden met elektromagnetische fenomenen. Het verminderen van de ongewenste emissie van een apparaat kan de immuñiteit voor externe storingen verhogen, en het verbeteren van de immuñiteit kan tegelijkertijd de invloed van ongewenste emissie op andere apparaten verminderen, omdat de koppelingsmechanismen, dat wil zeggen de koppelingspaden zoals hierboven beschreven, bidirectioneel zijn, lees: ze werken in beide richtingen.

Er zijn dus twee belangrijke aspecten die de kern van het EMC-vraagstuk raken:

- vermindering van straling van de primaire storingsbron;
- reductie van de potentiële koppelwegen.

Deze maatregelen zijn er niet om te voldoen aan EMC-normen, maar om de kwaliteit van een elektronisch product aanzienlijk te verhogen, een kwaliteit die de gebruiker op het eerste gezicht helaas niet kan herkennen, zoals een appel die van binnen rot is.

Ongecontroleerde elektromagnetische interferentie

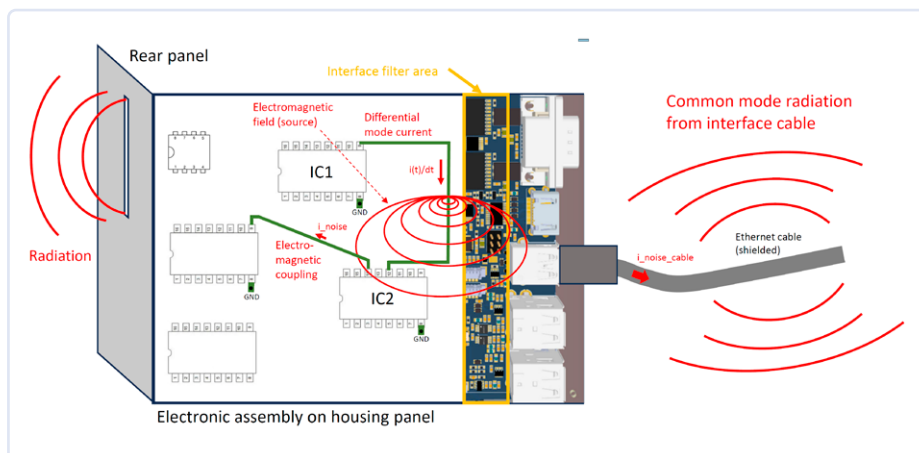
Figuur 1 toont het hierboven beschreven koppelingsmechanisme van interferentie via de elektronische module naar straling via een ethernetkabel.

Uitgaande van de stroomlus tussen IC1 en IC2, het retourpad via massa (GND), wordt een elektromagnetisch veld uitgezonden dat:

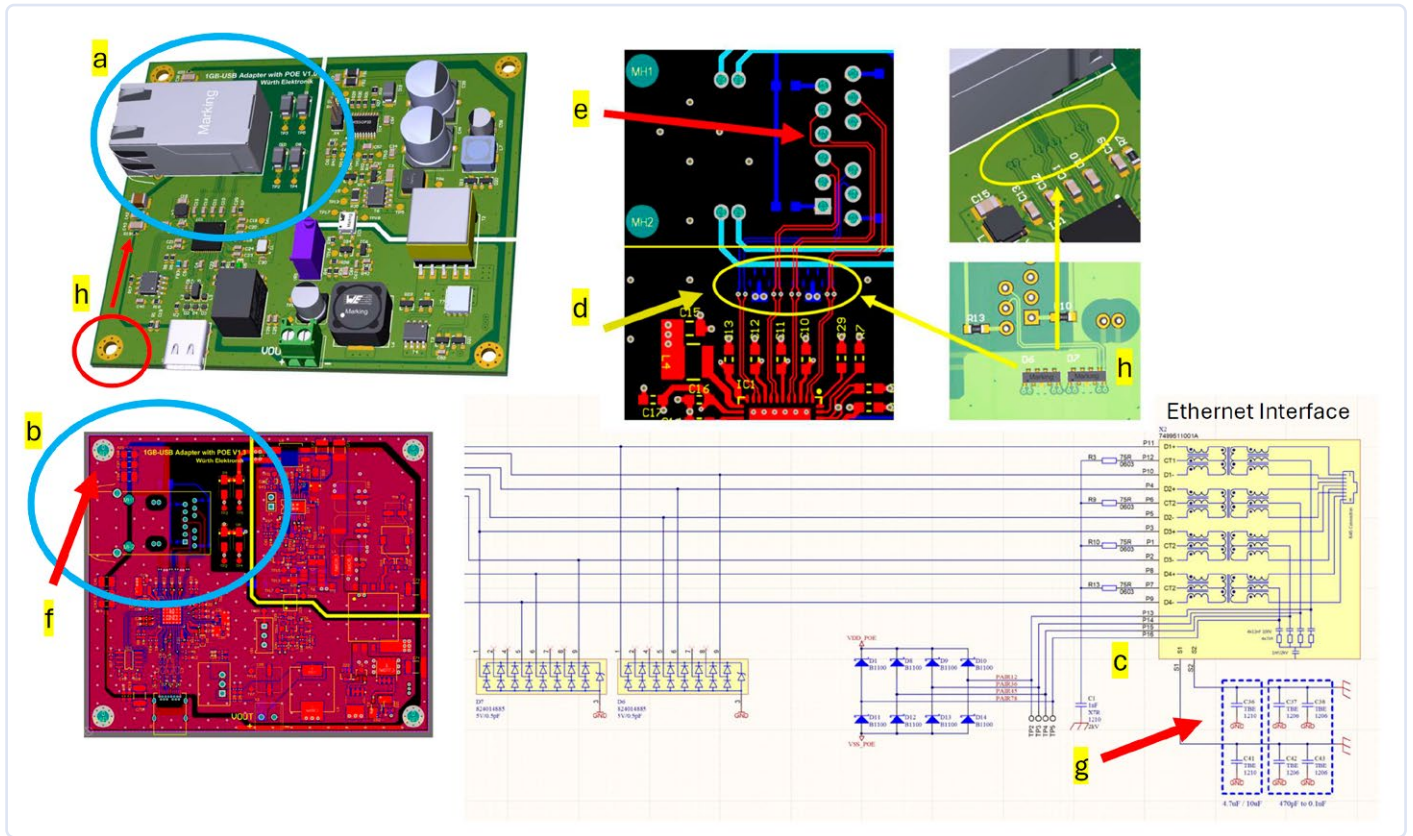
- koppelt met het interfacedeel van de module en daar, ook via de interfacefilters, naar de geleiders van de interfacekabels koppelt en tot interferentiestraaling via de kabel leidt. Door de beperkte demping van de kabelafscherming treedt zogenaamde common mode straling op via de kabel;
- koppelt met naburige geleiders en daarin een stoorstroom induceert, wat leidt tot verschillende soorten interferentie, afhankelijk van het type van het aanwezige signaal;
- wordt uitgestraald als een elektromagnetisch veld via gleuven, naden, ventilatieroosters enzovoort.

Het type elektromagnetische straling dat in figuur 1 is afgebeeld, is een variant van de straling die door elektronische schakelingen wordt uitgezonden. Andere oorzaken zijn:

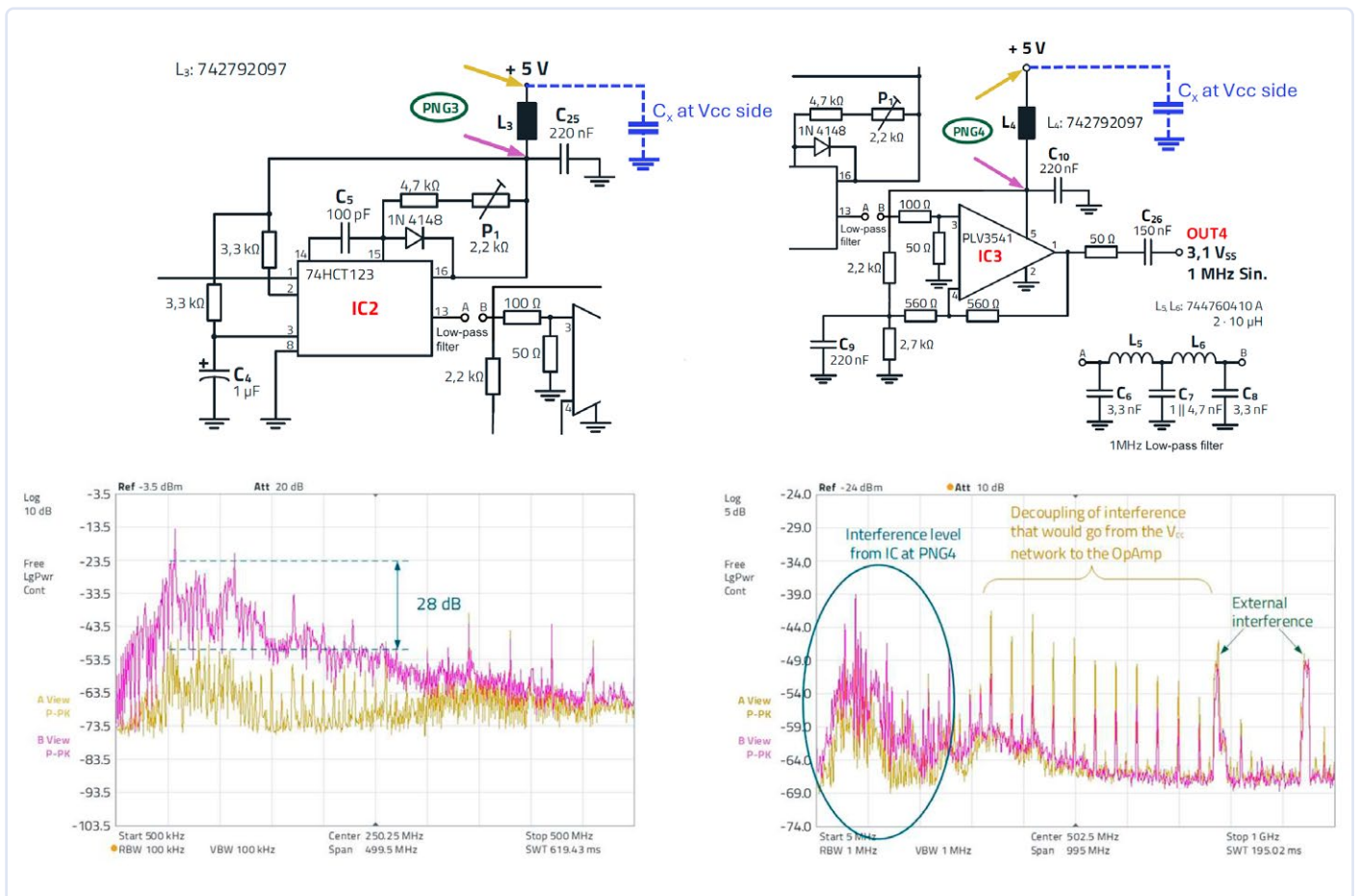
- misaanpassing tussen lijnen met bepaalde impedantie;
- asymmetrie in symmetrische signaalparen;
- slechte, bijvoorbeeld onderbroken, verbinding van de referentiemassa.



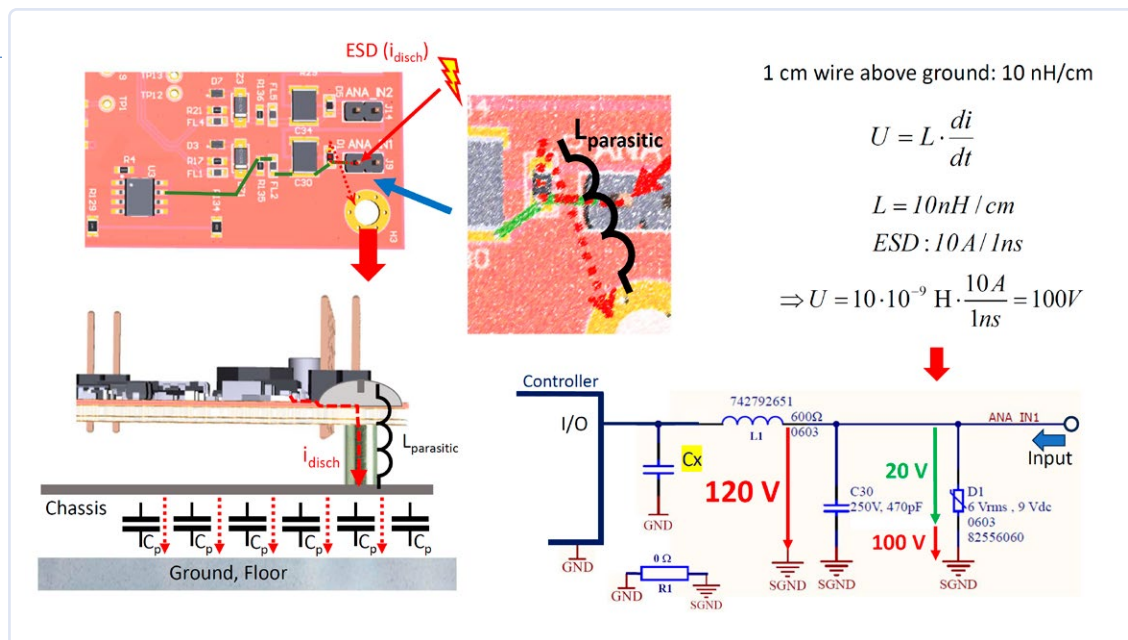
Figuur 1. Ongecontroleerde emissies van een signaalstroomlus op een elektronische module.



Figuur 2. Belangrijke structurele punten van een elektronische module (het interfacegebied).



Figuur 3. Illustratie van het effect van Vcc-ontkoppelfilters.



Figuur 4. Filter in het interfacegebied met bijbehorend aardingsconcept.

Een andere mogelijkheid van straling van elektronische schakelingen, hier niet afgebeeld, is de zogenaamde CM-straling, die wordt veroorzaakt door interferentie van dezelfde amplitude en fase op verschillende geleiders (bijvoorbeeld een differentieel USB-kabelpaar); de referentiepotentiala hiervan is de massalocatie (GND). Uiteindelijk vormt de schakeling op zijn beurt een lus die leidt tot koppelmecanismen zoals hierboven beschreven.

Verbetering van signaalintegriteit en EMC

Er kunnen verschillende maatregelen worden getroffen om de signaalintegriteit en EMC van elektronische apparaten te verbeteren en zo de beschreven problemen te vermijden. Hier volgen enkele veelgebruikte benaderingen:

1. **Layout:** een zorgvuldig ontworpen layout is cruciaal om signaalintegriteit te garanderen en elektromagnetische interferentie te minimaliseren. Dit omvat het minimaliseren van signaalpaden, het vermijden van misaansluiting, het plaatsen van componenten op voldoende afstand tot elkaar en het gebruik van massavlakken [1]. **Figuur 2** geeft een overzicht. De module in figuur 2 is een GB-Ethernet frontend met 'Power Over Ethernet'. De Ethernetverbinding (a) wordt gemaakt via een socket met een geïntegreerde interface (c), die transformatoren, aanpassingsnetwerken en CM-smoorspoelen bevat. Deze afgeschermd module vormt samen met de printbevestigingen (h)

de basis voor een massareferentie en een laagohmige verbinding met een plaatstalen behuizing. Voor installatie in een kunststof behuizing kan het aardingssysteem van de behuizing/PCB bovendien individueel worden ontworpen via montageposities (g, h). De vier Ethernetkanalen zijn gerouteerd als symmetrische paren printsporen (e), waarin de TVS-diodes (d) direct in de signaalweg zijn doorgevoerd. Alle paren zijn gebalanceerd met betrekking tot looptijd (skew) in hun lengte en systeemimpedantie (100 Ω gebalanceerd). Impedantiegecorrigeerde afscherming van de paren aan de linker- en rechterzijde met een massavlak vermindert parasitaire koppeling (h).

2. **Ontkoppelcondensatoren en Vcc/Vdd-filters:** ontkoppelcondensatoren en filters voor de IC-voeding worden direct bij de voedingsaansluitingen van de IC's geplaatst om hoogfrequente interferentie te blokkeren. Ze helpen niet alleen om spanningschommelingen te verminderen en een stabiele voeding te garanderen, maar blokkeren ook interferentie van het IC. De selectie van geschikte filtercomponenten is essentieel [2]. **Figuur 3** illustreert de situatie. De schakeling links in figuur 3 toont dat het π-filter, bestaande uit C25, het SMD-ferriet L3 en de condensatoren in de voeding, een verzwakking in het systeem veroorzaakt tot 28 dB. Het is belangrijk om te begrijpen dat deze verzwakking in beide richtingen werkt; dit geval wordt rechts geïllus-

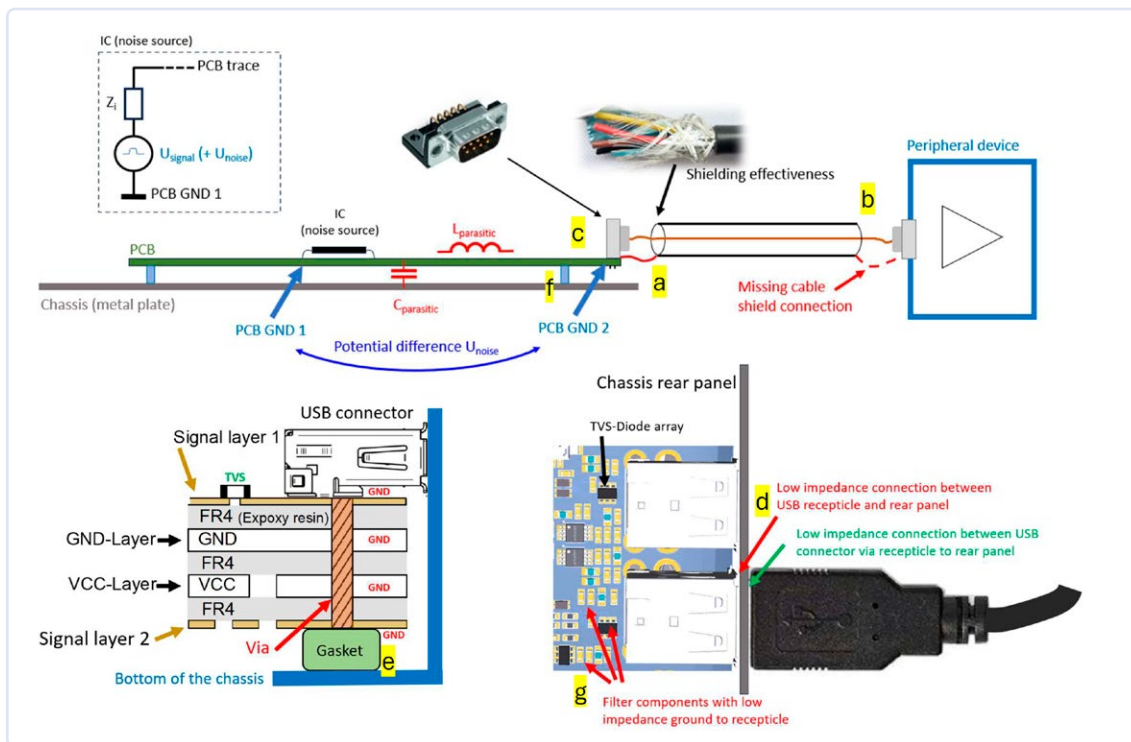
treerd in figuur 3. De stoortpotentiala aan de voedingszijde in het frequentiebereik boven ongeveer 300 MHz wordt met ongeveer 10 tot 15 dB verzwakt in de richting van versterker IC3, terwijl de stoortpotentiala aan de versterkerkant in het bereik tot 300 MHz door het filter tot 20 dB wordt verzwakt in de richting van de voedingskant.

3. Filtering bij interfaces, massaverbinding en aarding:

het gebruik van filters zoals laagdoorlaatfilters en, indien nodig, banddoorlaatfilters met transiëntbeveiliging helpt om ongewenste frequenties te verwijderen of te verzwakken en houdt hoogfrequente interferentie en transiënte overspanningen weg van de interne elektronica van het apparaat.

Figuur 4 toont een voorbeeld van een filterconcept bij interfaces.

Het π-filter heeft een varistor aan de ingang om transiënte overspanningen te begrenzen. De referentiemassa voor de overspanningsbeveiliging moet de interferentiepotentiala zijn, dat wil zeggen het plaatmateriaal van de behuizing en daarboven de capaciteit naar de basis van de behuizing. **Figuur 4** toont het effect van een parasitaire inductie in de voedingslijn naar de varistor. Een parasitaire inductie van slechts 10 nH verhoogt de klemspanning met 100 V als bijvoorbeeld een ESD-puls met een stroom van slechts 10 A als basis wordt gebruikt. Aan de kant van de regelaar moeten filters en, indien nodig, extra spanning-begrenzende componenten worden aangesloten op de GND-re-



Figuur 5. Illustratie van de belangrijkste EMC-taken van een behuizing.

ferentie van de regelaar! SGND en GND worden op geschikte punten in de layout met elkaar verbonden via nul-ohm-weerstanden, SMD-ferrieten of condensatoren. Voor meer uitleg over de doeltreffendheid van het aardingsconcept verwijzen we naar het referentieontwerp RDO16 [3].

4. **Afscherming:** het gebruik van afschermingen of schermen rond gevoelige componenten of printsporen kan helpen om elektromagnetische straling te beperken en interferentie te verminderen (figuur 2h). Het algemene concept van de behuizing, bestaande uit een metalen omhulsel met zo weinig mogelijk openingen en spleten, is echter de beslissende factor. De hoogst mogelijke afschermingsdemping van de behuizing garandeert over het algemeen ook een RF-conforme massareferentie voor de interfacefilters en de aangesloten afgeschermd perifere kabels (figuur 5).

Alleen een kabelafscherming die aan beide zijden met massa is verbonden (a, b) biedt ook afscherming tegen magnetische velden. Hiervoor is het noodzakelijk dat de stekerverbinding

(c) rondom een laagohmig contact maakt met de behuizing (d). Extra laagimpedante galvanische verbindingen kunnen worden gerealiseerd door contact te maken met de module in het filtergebied (e, f). Dit verbetert de afscherming van de perifere kabels aanzienlijk en geeft TVS-diodes, SMD-varistoren en filtercondensatoren een 'betere' massareferentie (g). Een laagohmige verbinding van de GND-referentielaag (f) vermindert de CM-interferentie op de referentiemassa en verbetert de signaalintegriteit van de gehele schakeling.

Een holistische kijk op signaalintegriteit en EMC

Een holistische benadering van de hierboven beschreven maatregelen voor signaalintegriteit en EMC-ontwerp is nodig om optimale prestaties en betrouwbaarheid van elektronische assemblages te garanderen. De selectie van de juiste componenten, een zorgvuldige layout, de impedantie van de verbindingen, van signaal- en stroomlussen en minimalisering van signaalreflecties zijn essentieel. Een juist ontwerp van aardingsconcepten is cruciaal voor het vermijden van aardlussen en het minima-

liseren van parasitaire impedantie die de effectiviteit van filters en kabelafschermingen verminderen. Alleen een combinatie van bovengenoemde maatregelen kan zorgen voor het ontwerp van een apparaat met zowel signaalintegriteit als EMC. ◀

240683-03 (vertaling: Willem den Hollander)



Over de auteur

Dr.-Ing. Heinz Zenkner studeerde elektrotechniek met zwaartepunten telecommunicatie en radiofrequentietechniek en promoveerde op dit gebied. Hij is al vele jaren officieel aangesteld als beëdigd expert voor EMC. Naast talrijke wetenschappelijke publicaties levert hij regelmatig bijdragen als auteur in vele werken over EMC. Heinz heeft gewerkt aan verschillende universiteiten, bij de Duitse Kamer van Industrie en Handel (IHK) en heeft talloze seminars gegeven. Hij houdt zich al jaren bezig met industriële elektronica, van het eerste productconcept tot serieproductie. Zijn speciale interesse ligt bij draadloze energieoverdracht, waarvoor hij zijn eigen theoretische en praktische concepten heeft ontwikkeld en gepatenteerd.

WEBLINKS

- [1] Zenkner, H. "GB PoE+-Ethernet-USB adapter for industrial use with an EMC perspective," Reference design RD022 from Würth Elektronik: <http://www.we-online.com/RD022>
- [2] Zenkner, H. "Inductive SMT Components in Comparison – the Wire Makes the Difference," Application Note ANP129 from Würth Elektronik: <http://www.we-online.com/ANP129>
- [3] Zenkner, H. "Gigabit-Ethernet Front-End," Reference Design RD016 from Würth Elektronik: <http://www.we-online.com/RD016>

Alle begin...

...filtert actief

Eric Bogers (Elektor)

In de vorige aflevering hebben we een voorzichtig begin gemaakt met de bespreking van actieve filters – die ten opzichte van hun passieve tegenhangers enkele niet te versmaden voordelen hebben, bijvoorbeeld de mogelijkheid om eventuele verliezen met een beetje versterking te compenseren. In deze eerste aflevering van het nieuwe jaar duiken we met frisse moed in de wereld der actieve filterschakelingen.

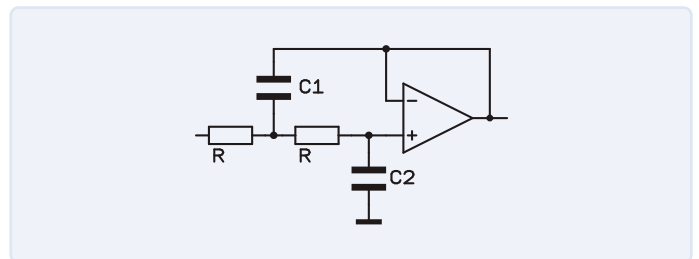
Eénmaal versterkend laagdoorlaatfilter

Figuur 1 toont een tweede-orde laagdoorlaatfilter met een versterking van éénmaal. Die versterking van éénmaal wil zeggen dat het signaal in het doorlaatbereik noch versterkt noch verzwakt wordt. Later zullen we zien dat het handig kan zijn om het filter een klein beetje te laten versterken.

De schakeling als getekend is een zogenaamd Sallen-Key-filter; hierbij hebben we niet te maken met twee in serie geschakelde RC-laagdoorlaatfilters, maar veeleer met een door C1 lichtjes meegekoppelde schakeling waardoor het filter bij de kantelfrequentie wat “scherper” reageert: bij zeer hoge frequenties ligt de uitgang van de opamp vrijwel aan massa, condensator C1 vormt samen met R een laagdoorlaatfilter. Bij zeer lage frequenties voert de uitgang dezelfde potentiaal als de ingang en heeft C1 geen effect.

De dimensionering van de onderdelen hangt van de gewenste filterkarakteristiek af:

- › Het **Linkwitz-Riley**-filter wordt gekenmerkt door een overnamefrequentie die bij het -6 -dB-punt ligt. Daarin verschilt dit filter van andere filters waarbij de overnamefrequentie is gedefinieerd als die frequentie waarbij de spanning ten opzichte van het doorlaatbereik met 3 dB is afgenomen. Wanneer bij andere filters de signalen van hoog- en laagdoorlaatfilter worden opgeteld (onder de aanname dat de overnamefrequenties hetzelfde zijn), dan ontstaat bij die frequentie een piek van $+3$ dB. Dat is bij Linkwitz-Riley-filters niet het geval,



Figuur 1. Tweede-orde laagdoorlaatfilter.

en daarom wordt deze karakteristiek graag voor actieve wissel-filters gekozen.

Linkwitz-Riley-filters zijn in vergelijking met andere filters niet bijzonder scherp, maar vertonen juist om die reden wel een goed impulsgedrag. De gerige scherpte kan worden gecompenseerd door hogere-orde-filters te gebruiken. De Linkwitz-Riley-karakteristiek is daarom eigenlijk alleen gebruikelijk voor vierde-orde-filters (met een verzwakking van 24 dB/octaaf).

Voor een tweede-orde-filter hebben beide condensatoren dezelfde waarde, die wordt berekend met:

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R}$$

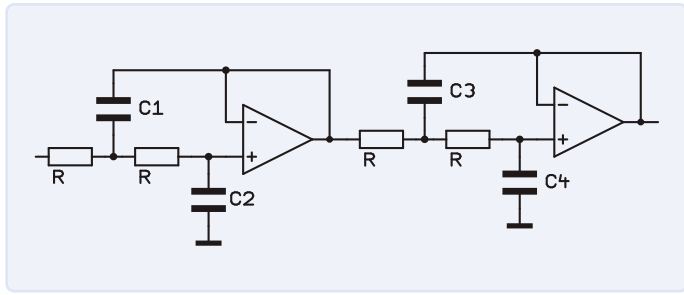
- › Het **Bessel-filter** lijkt sterk op het Linkwitz-Riley-filter, maar heeft de overnamefrequentie bij het -3 -dB-punt.

$$C_1 = \frac{0,9076}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R}$$

$$C_2 = \frac{0,6809}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R}$$

De twee condensatoren hebben niet dezelfde waarde, en dat kan in de praktijk aanzienlijke problemen met de verkrijgbaarheid opleveren. Later zullen we zien hoe deze problemen kunnen worden omzeild.

- › Het **Butterworth-filter** is scherper maar vertoont daardoor een slechter impulsgedrag. Dit is een zogenaamd kritisch gedempt filter: het vertoont de grootst mogelijke scherpte waarbij nog net geen rimpel in het doorlaatbereik optreedt.



Figuur 2. Vierde-orde laagdoorlaatfilter.

$$C_1 = \frac{1,414}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R}$$

$$C_2 = \frac{0,7071}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R}$$

Nog scherpere filters – zoals het Chebychev-filter – vertonen een slecht impulsgedrag en worden dan ook slechts daar gebruikt waar het werkelijk op de hoogste scherpte aankomt.

Figuur 2 toont een vierde-orde-filter. In principe gaat het daarbij om een serieschakeling van twee tweede-orde-filters – maar dan wel met aangepaste dimensionering: als we twee “volgens het boekje” berekende tweede-orde-filters in serie zouden zetten, dan zouden we bij de overnamefrequentie een verzwakking van 6 dB of zelfs 12 dB (Linkwitz-Riley) krijgen.

› Voor het Linkwitz-Riley-filter worden de coëfficiënten van het tweede-orde Butterworth-filter gebruikt. Zoals we eerder al opmerkten, vertoont het Linkwitz-Riley-filter principieel een verzwakking van 6 dB bij de overnamefrequentie.

$$C_1 = C_3 = \frac{1,414}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R}$$

$$C_2 = C_4 = \frac{0,7071}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R}$$

› Voor het Bessel-filter geldt:

$$C_1 = \frac{0,7298}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R} \quad C_2 = \frac{0,6699}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R}$$

$$C_3 = \frac{1,0046}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R} \quad C_4 = \frac{0,3872}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R}$$

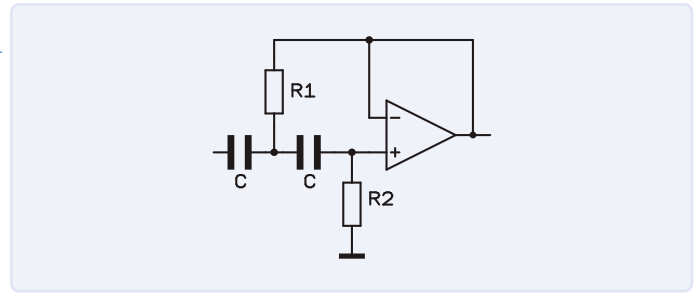
› En voor het Butterworth-filter worden deze coëfficiënten gebruikt:

$$C_1 = \frac{1,0824}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R} \quad C_2 = \frac{0,9239}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R}$$

$$C_3 = \frac{2,6130}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R} \quad C_4 = \frac{0,3872}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R}$$

Indien mogelijk worden de weerstandswaarden in het bereik van 2,2 kΩ tot 22 kΩ gekozen. Bij kleinere waarden moeten de operationele versterkers nodeloos veel stroom leveren en wordt er bij grote signalen vervorming geïntroduceerd; te grote weerstandswaarden leiden tot een nodeloos slecht ruisgedrag.

De coëfficiënten hebben ten opzichte van elkaar geen handige verhouding (afgezien van het Linkwitz-Riley-filter), zodat de juiste



Figuur 3. Tweede-orde hoogdoorlaatfilter.

waarden moeten worden samengesteld door vernuftige serie- en parallelschakeling van standaardwaarden.

Bij het Linkwitz-Riley-filter zijn C_1 en C_3 precies twee keer zo groot als C_2 en C_4 . Omdat de waarden van condensatoren doorgaans in de E6- of E12-reeks passen, is een dubbele waarde alleen via parallelschakeling te verkrijgen – maar dan gelukkig wel tamelijk nauwkeurig.

Eénmaal versterkend hoogdoorlaatfilter

In vergelijking met een laagdoorlaatfilter zijn bij een hoogdoorlaatfilter de weerstanden en condensatoren van plaats verwisseld (**figuur 3**), terwijl voor de coëfficiënten de reciproke waarde wordt gebruikt. Omdat condensatoren met een gelijke waarde worden gebruikt, zal de verkrijgbaarheid van de onderdelen naar alle waarschijnlijkheid minder problemen opleveren.

› Linkwitz-Riley:

$$R_1 = R_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

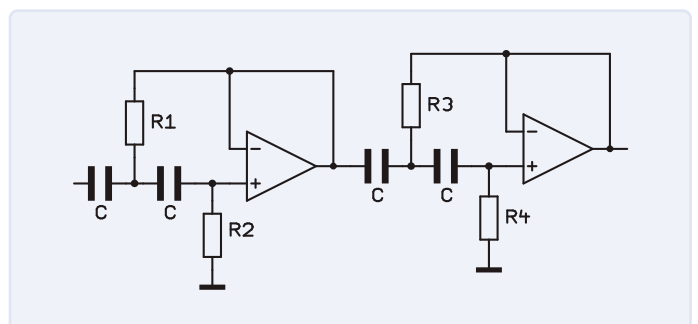
› Bessel:

$$R_1 = \frac{1,1017}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad R_2 = \frac{1,4688}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

› Butterworth:

$$R_1 = \frac{0,7071}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad R_2 = \frac{1,414}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Een vierde-orde hoogdoorlaatfilter bestaat uit een serieschakeling van twee tweede-orde hoogdoorlaatfilters (**figuur 4**).



Figuur 4. Vierde-orde hoogdoorlaatfilter.

› Linkwitz-Riley:

$$R_1 = R_3 = \frac{0,7071}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

$$R_2 = R_4 = \frac{1,414}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

› Bessel:

$$R_1 = \frac{1,3701}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad R_2 = \frac{1,4929}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

$$R_3 = \frac{0,9952}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad R_4 = \frac{2,5830}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

› Butterworth:

$$R_1 = \frac{0,9239}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad R_2 = \frac{1,0824}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

$$R_3 = \frac{0,3827}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad R_4 = \frac{2,6130}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Dat zijn voorlopig genoeg formules; hier laten we het voor deze keer bij. In elk geval kunt u nu zelf gaan experimenteren; volgende keer behandelen we filters die meer dan éénmaal versterken. ◀

240637-03

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

Word lid van onze Community



www.elektormagazine.nl/community



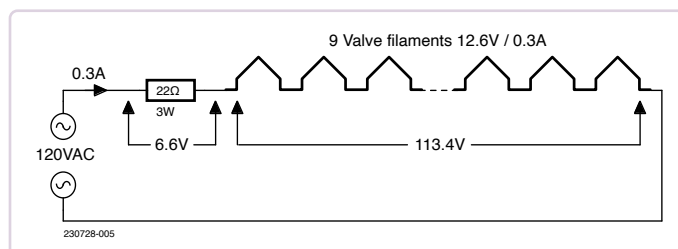
$F(h, k, l) = A + i \cdot B$ $F(h, k, l)$
 $\Delta F = \Delta t \geq h - k$

Reduceer vermogensverlies met seriecondensatoren

slim gebruik van capacatieve reactantie

Christoph Biel (Zwitserland)

Het gebruik van weerstanden in serie met ohmse belastingen heeft vaak tot gevolg dat (te) veel energie wordt gedissipeerd. Als u met een AC-schakeling werkt, kan het gebruik van seriecondensatoren dit tot een minimum beperken, en voor een low-power voeding kunnen deze een goed alternatief zijn voor transformatoren.



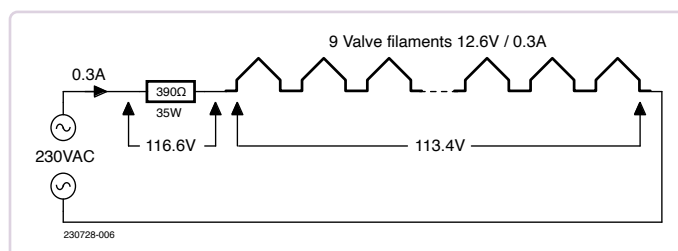
Figuur 1. Bij relatief lage ingangsspanningen is het gebruik van serieweerstanden in sommige gevallen nog steeds eenvoudig en kosteneffectief, zelfs vanuit energetisch oogpunt.

In elektronische schakelingen moeten we vaak spanningen verlagen. Het is een kwestie van gezond verstand om een grote spanningsval over weerstanden of lineaire regelaars te vermijden, alleen al vanwege de grote hoeveelheid energie (en warmte...) die zou worden gedissipeerd – en verspild.

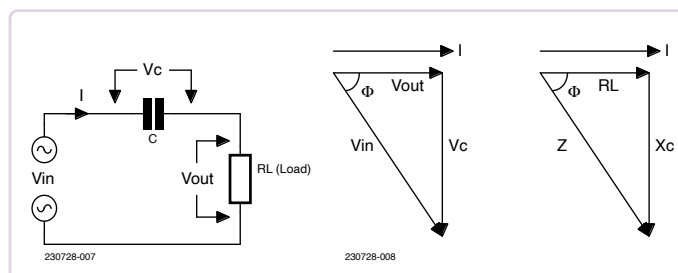
Een eerste praktijkvoorbeeld

In wisselstroomschakelingen is de meest gebruikte component om een forse spanningsval te krijgen de transformator, maar deze is groot, zwaar en relatief duur. Om een mogelijke oplossing te vinden, gaan we uit van het praktijkvoorbeeld in **figuur 1**. Het betreft een ontwerp op basis van vacuümbuizen, waarbij de direct verwarmde gloeidraden van de buizen in serie met een weerstand van 22 Ω zijn aangesloten op 120 VAC bij 50 Hz. Deze oplossing is goedkoop en prima geschikt voor landen waar de netspanning 120 V bedraagt. Als we in landen met 230V-netspanning hetzelfde principe zouden toepassen, zou het vermogen dat door de serieweerstand wordt gedissipeerd toenemen van 2 W tot bijna 35 W, zoals blijkt uit **figuur 2** – een onaanvaardbare energieverpilling.

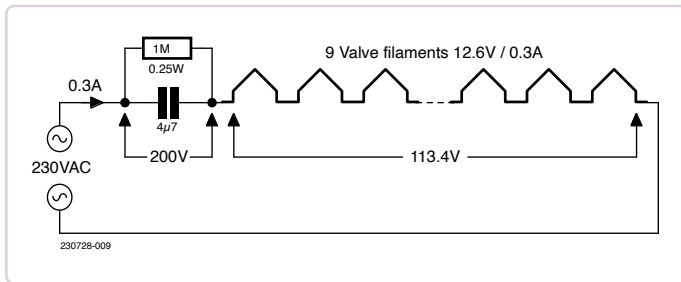
Een mogelijk alternatief voor het gebruik van zo'n serieweerstand wordt geboden door een eigenschap van condensatoren – de capacatieve reactantie. De condensator veroorzaakt een faseverschuiving ϕ tussen V_{out} en V_{in} . De eigenschappen van de schakeling van **figuur 3a** (links) worden berekend met behulp van de driehoeken in **figuur 3b** (rechts).



Figuur 2. Bij hogere voedingsspanningen, zoals in de EU, is deze oplossing niet langer haalbaar vanwege de hoge vermogensdissipatie en de grote omvang die zo'n weerstand als gevolg daarvan zou moeten hebben.



Figuur 3. Hier wordt een condensator gebruikt om een ohmse belasting van stroom te voorzien door een spanningsval te veroorzaken, gebruikmakend van zijn typische capacatieve reactantie. In dit ontwerp stellen de driehoeken rechts de relaties voor tussen de parameters V , I , C , X en Z .



Figuur 4. Met behulp van de formules in de tekst werd de capaciteit berekend die nodig is om een V_{out} van 113,4 V te verkrijgen bij een V_{in} van 230 VAC. De weerstand van 1 MΩ ontlad de condensator na afschakelen van de netspanning.

De berekeningen luiden:

$$V_c = \sqrt{V_{in}^2 - V_{out}^2} \quad X_c = \frac{V_c}{I} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad C = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_c}$$

Met

C = condensator, X_c = diens capacatieve reactantie,
 Z = totale impedantie, R_L = belasting

en

V_{in} = ingangsspanning, V_{out} = uitgangsspanning,
 V_c = spanning over de condensator, I = stroom

Wanneer we gebruikmaken van een condensator om de spanning in de schakeling van figuur 2 te reduceren, wordt het schema zoals getekend in **figuur 4**.

Dat resulteert in de formules:

$$V_c = \sqrt{V_{in}^2 - V_{out}^2} = \sqrt{(230 \text{ V})^2 - (113,4 \text{ V})^2} = 200 \text{ V}$$

$$C = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_c} = \frac{0,3 \text{ As}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 200 \text{ V}} = 4,7 \text{ } \mu\text{F} \quad (3,98 \text{ } \mu\text{F in 60Hz-areas)}$$

De weerstand van 1 MΩ heeft nauwelijks invloed tijdens de werking van de schakeling. Hij dient om de condensator te ontladen wanneer de netspanning wordt uitgeschakeld.

Een laagspanningstoepassing

In een kleine fabriek assembleren enkele werknemers printplaten en elektrotechnische apparaten. Ze gebruiken Weller WTCP-soldeerbouten (24 V/50 W), gevoed door een centrale 24V-transformator met een nominaal vermogen van 600 VA.

Soms worden echter printplaten met SMD-componenten geassembleerd met kleinere soldeerbouten (12 V/25 W, zoals de Antex MLSX). Voor het gemak moeten ze gevoed worden door de beschikbare centrale transformator(en); de schakeling van **figuur 5** kan dit mogelijk maken, zodat er geen speciale 12VAC-transformator nodig is. Door de formules toe te passen die we al hebben gezien, vinden we de theoretische waarde voor de seriecondensator:

Onderdelenlijst

Let op: de waarden van de componenten in deze lijst zijn alleen bedoeld voor het schakeling van figuur 5 en de belasting die daar is gespecificeerd. Voor andere doeleinden moeten de waarden opnieuw worden berekend.

Condensatoren:

$C1..C6$ = aluminium/polymeer-condensator 220 μF (Kemet A759MY227M1JAAE045) [3].

Halfgeleiders:

$D1, D2$ = Schottky-diode SB150

Diversen:

$X1, X2$ = 2-polige printkroonsteen, steek 5,08 mm

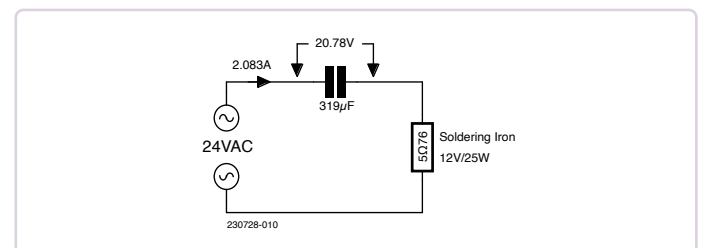
$F1$ = zekeringhouder 5x20 met zekering 2,5 A

$$V_c = \sqrt{V_{in}^2 - V_{out}^2} = \sqrt{(24 \text{ V})^2 - (12 \text{ V})^2} = 20,78 \text{ V}$$

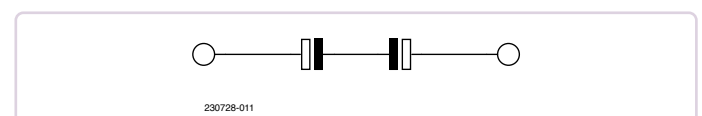
$$C = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_c} = \frac{2,083 \text{ As}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 20,78 \text{ V}} = 319 \text{ } \mu\text{F}$$

De dichtstbijzijnde uit voorraad leverbare standaardwaarde is 330 μF , maar film- of MP-condensatoren met deze waarde zijn niet verkrijgbaar. Er bestaan weliswaar bipolaire elektrolytische condensatoren, maar deze hebben het nadeel van een hoge ESR (equivalente serieweerstand), waardoor ze warm worden, wat resulteert in een kortere levensduur.

De combinatie van twee elektrolytische condensatoren van gelijke waarde (**figuur 6**) gedraagt zich als een bipolaire elektrolytische condensator. Merk op dat in deze toepassing de totale capaciteit gehalveerd is ten gevolge van de serieschakeling van twee condensatoren.



Figuur 5. Om een 12 V/25 W soldeerbout van stroom te voorzien via een 24VAC-distributieleiding, maakt deze oplossing een transformator overbodig.

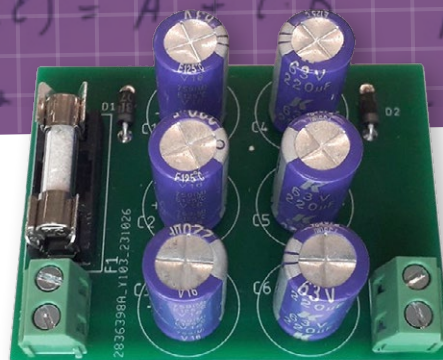


Figuur 6. Als er geen bruikbare bipolaire condensatoren beschikbaar zijn, kunnen twee normale (gepolariseerde) elektrolytische condensatoren in 'antiserie' worden geschakeld. De resulterende capaciteit is de helft van de nominale waarde.

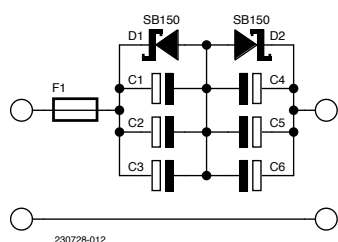


Waarschuwing

Gebruik voor deze schakelingen uitsluitend spanningsbestendige X2-condensatoren [1] of MP-condensatoren voor motoren [2] en monteer altijd een zekering in serie met de schakeling. Het gebruik van onjuiste condensatoren en/of condensatoren met een te lage werkspanning in deze toepassing kan leiden tot een abnormale belasting van die condensatoren, wat op zijn beurt oververhitting, gasontlading en ontploffen van de behuizing! Neem altijd alle noodzakelijke veiligheidsmaatregelen in acht bij het werken met de netspanning!



Figuur 9. Het opgebouwde prototype. Zorg ervoor dat u condensatoren van het in dit artikel aanbevolen type gebruikt [3]. Gebruik nooit gewone, standaard elektrolytische condensatoren in dit ontwerp!

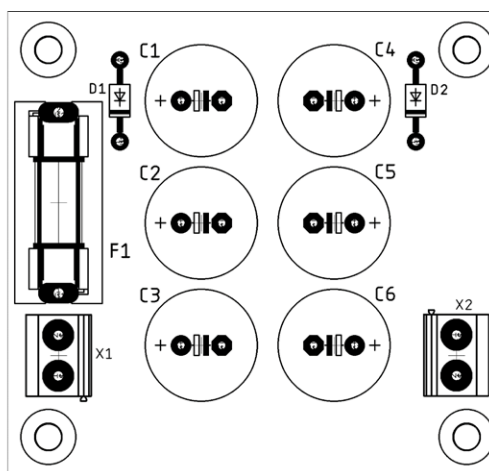


Figuur 7. Schema van een spanningsdaller met capacitieve reactantie. De capaciteitswaarden moeten per geval worden berekend, afhankelijk van de elektrische eigenschappen van de belasting.

Daarom is de schakeling van **figuur 7** ontwikkeld. C1...C6 zijn aluminium/polymeer-condensatoren met lage ESR en hoge rimpelstroom. Deze opstelling gedraagt zich als een bipolaire condensator; de extra Schottky-diodes D1 en D2 zijn nodig als beveiliging tegen omgekeerde polariteit.

Afhankelijk van de momentane halve golf dient de linkerkant (D1 tot C3) of de rechterkant (D2 tot C6) van de schakeling als seriecondensator. De spanningswaarden van de condensatoren en diodes moeten hoger zijn dan de piekspanning V_{in} . De parallelschakeling van meerdere condensatoren verlaagt de totale ESR.

Figuur 8 toont een simulatie met LTSpice. Het groene spoor vertegenwoordigt de piek/peik-waarde van V_{in} ($24 V_{RMS}$ AC), het blauwe de halve golf van D1, het rode spoor de halve golf van D2.



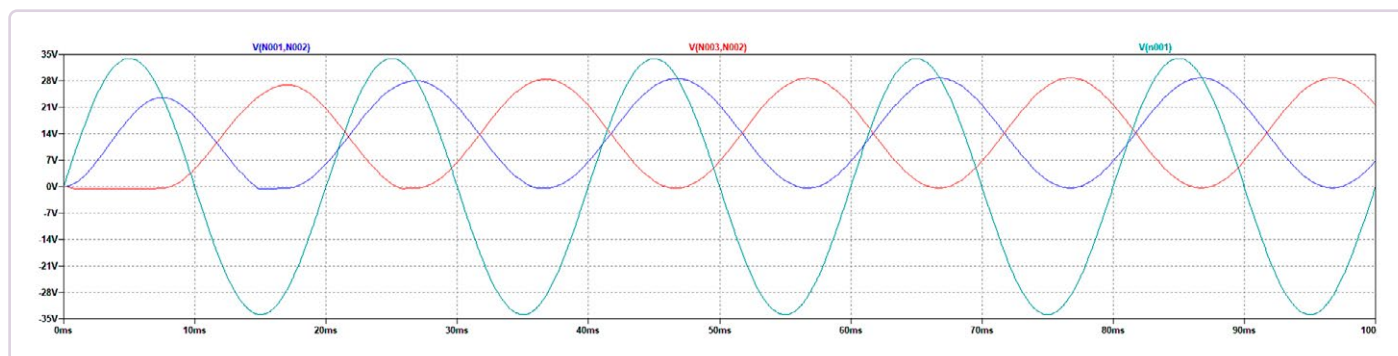
Figuur 10. Opdruk van de componentenzijde van de print.

Het prototype

Figuur 9 toont het opgebouwde prototype van de print, en **figuur 10** de opdruk van de componentenzijde.

We kunnen deze schakeling aan onze eigen behoeften aanpassen door de benodigde capaciteit te berekenen. Bepaal deze door twee of meer spanningsvaste condensatoren en geschikte Schottky-diodes te combineren. Maar vergeet de zekering niet! ❖

230728-03



Figuur 8. LTSpice-simulatie van het ontwerp van figuur 7, met een ingangsspanning van $24 V_{RMS}$.

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via hb9dkq@gmx.ch of naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.



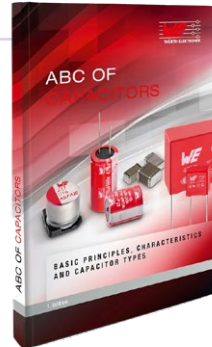
Over de auteur

Christoph Biel is laboratoriumingenieur en werkt in een onderwijsinstelling. Hij traint studenten, leerlingen en jongeren in elektronica en amateur-radio-technologieën. Hij is radioamateur (HB9DKQ) sinds 1979.



Gerelateerd product

> Stephan Menzel, *ABC of Capacitors* (Würth, 2021) www.elektor.nl/16630



WEBLINKS

- [1] Filmcondensatoren (Wikipedia): https://en.wikipedia.org/wiki/Film_capacitor
- [2] Motorcondensatoren (Wikipedia): https://en.wikipedia.org/wiki/Motor_capacitor
- [3] Datasheet — Kemet Radial Solid Polymer Aluminum Capacitors [PDF]: <https://tinyurl.com/kemetpolycaps>



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

Dus, waarom nog langer wachten? Abonneer u vandaag nog op www.elektor.nl/ezine/nl en ontvang direct een **coupon** waarmee u **€5** korting krijgt op uw volgende bestelling in de webshop.



De betaalbare MCP4725 12-bit digitaal/analoog-omzetter

EEPROM-functie zorgt voor veilig inschakelgedrag

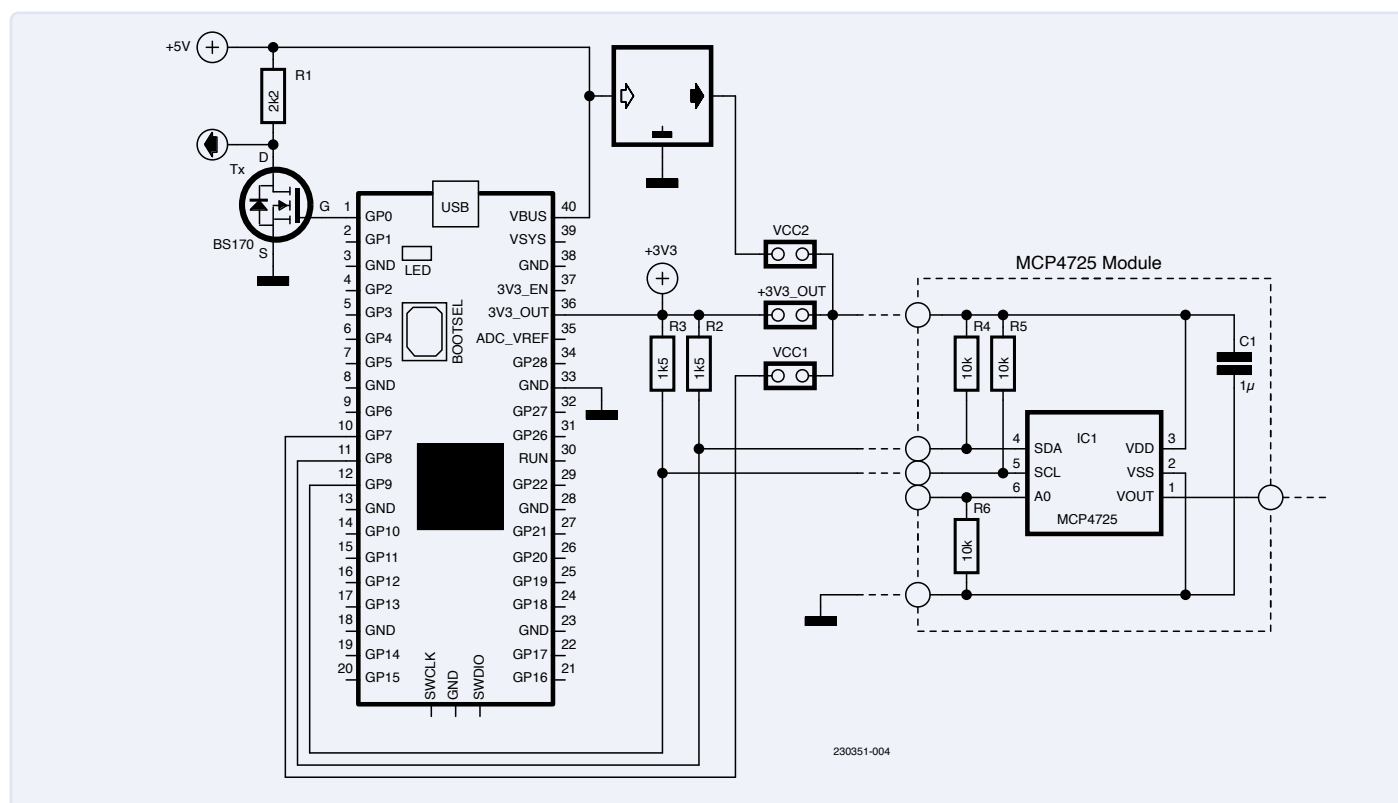
Prof. dr. Martin Ossmann (Duitsland)

De MCP4725 12-bit digitaal/analoog-omzetter van Microchip Technology kost slechts ongeveer \$ 1. Hij heeft een I²C-interface en kan worden gebruikt met een voedingsspanning van 2,7..5,5 V. In dit artikel bekijken we het inschakelproces met behulp van een Raspberry Pi Pico en laten we zien hoe u de MCP4725 kunt gebruiken om snel na het inschakelen een voorinstelde waarde te genereren.

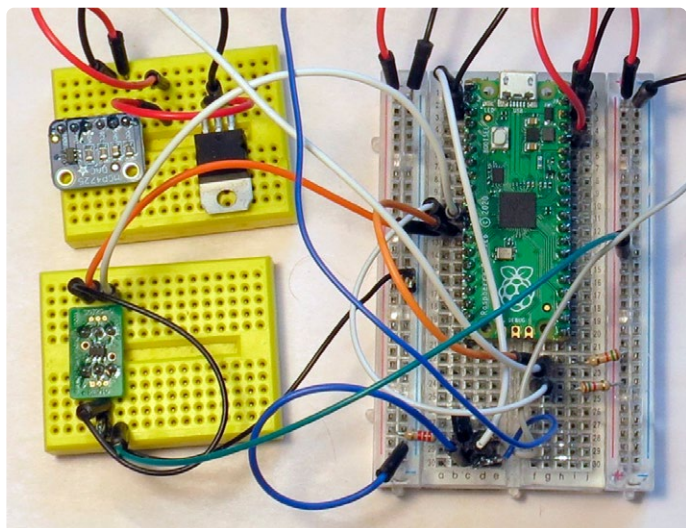
Een speciale eigenschap van de MCP4725 van Microchip is de on-chip EEPROM. Hierdoor kan de DAC direct na het inschakelen een vooraf ingestelde waarde leveren. Dit is van cruciaal belang voor sommige toepassingen. Tegenwoordig worden bijvoorbeeld instelpotmeters in schakelingen vaak vervangen door DAC's, omdat de parameters dan via software kunnen worden ingesteld. Dit

kunnen bijvoorbeeld offsetvariabelen of werkpuntinstellingen zijn. Normale DAC's vertonen echter direct na het inschakelen ofwel ongedefinieerd gedrag of leveren een nul-uitgangswaarde. De juiste waarden kunnen pas worden ingesteld als de CPU klaar is voor gebruik, wat enige tijd kan duren.

Om dit te illustreren kijken we naar **figuur 1**, waarin de MCP4725



Figuur 1. Aansluiting van de MCP4725 op de Raspberry Pi Pico.



Figuur 2. Opbouw van de testschakeling op breadboards.

wordt aangestuurd door een Raspberry Pi Pico. Voor de DAC-chip zijn breakout-boards verkrijgbaar, bijvoorbeeld bij Adafruit, waarop de weerstanden R4, R5 en R6 en de ontkoppelcondensator C1 al zijn gemonteerd. De MCP4725 betreft normaal gesproken zijn voedingsspanning VDD van de 3V3 Out-pin van de Pico. Deze testschakeling is opgebouwd op breadboards (figuur 2). De MCP4725 is aangesloten met een eenvoudige SOT23-6 adapter (linksonder). Daarboven is ook het kleine adapterprintje van Adafruit te zien, dat op de foto niet is aangesloten.

Inschakelgedrag

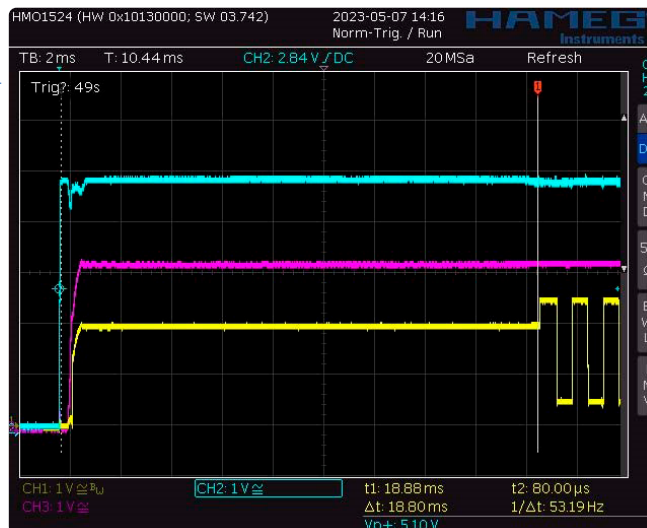
Onze testsoftware schakelt de DAC-waarde onmiddellijk na het inschakelen heen en weer tussen 2,5 V en 0,5 V. Listing 1 toont een fragment van het C-programma, dat kan worden gedownload van [1].

De USB-voeding wordt ingeschakeld met een conventionele mechanische schakelaar. Figuur 3 toont het opkomen van de 5V-voeding bij het inschakelen (cyaankleurige curve). Kort daarna komt de 3,3V-CPU-voeding op (paars) en is na ongeveer 1 ms beschikbaar. Het omschakelen (geel) begint echter pas na ongeveer 20 ms. Dit is de tijd die de CPU nodig heeft voor het opstartproces. Dat is een behoorlijk lange tijd, waarin van alles mis kan gaan als de DAC's nog niet de juiste waarden leveren.

Dit is precies waar de EEPROM-functie van de MCP4725 om de hoek komt kijken. De MCP4725 laadt de DAC direct na het inschakelen met de EEPROM-inhoud, zodat de gewenste waarden zeer snel beschikbaar zijn na het inschakelen. Deze DAC kan zelfs worden gebruikt met apparaten die geen microcontroller hebben. Bij de eerste keer opstarten wordt het IC verbonden met een controller om de parameters in te stellen, maar later zorgt de EEPROM-functie ervoor dat de juiste waarde beschikbaar is.

I²C-adressen

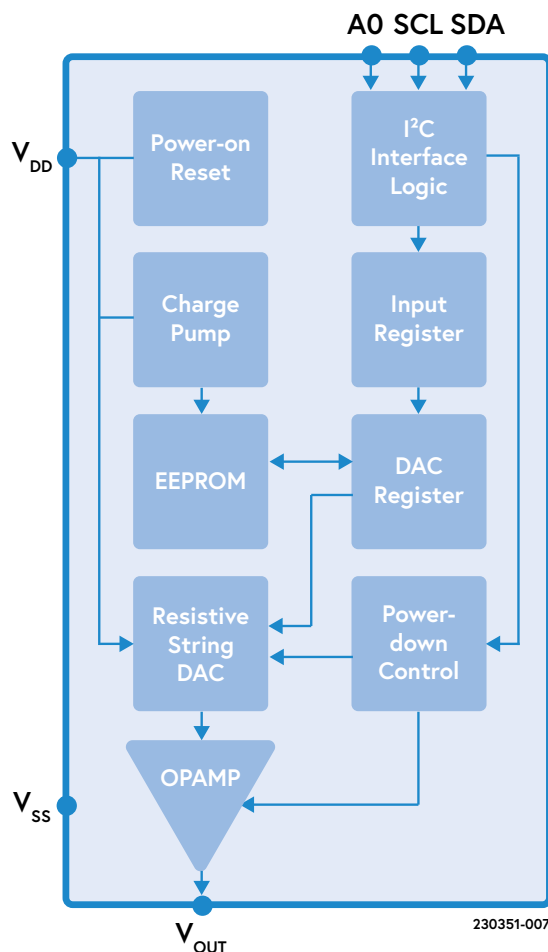
De interne structuur van de MCP4725 is geschetst in figuur 4. De MCP4725 heeft een I²C-interface voor communicatie met de CPU. In principe kunnen acht verschillende I²C-adressen worden ingesteld, waarbij vier verschillende adressen al vooraf zijn geconfigureerd tijdens de productie (via A2 en A1). Welke adressen (of adresbereiken) worden gebruikt, is te zien aan de markering van het IC (tabel 1). Het laatste bit van het I²C-adres kan worden ingesteld via de Ao-pin (zie de datasheet van de MCP4725 [2]).



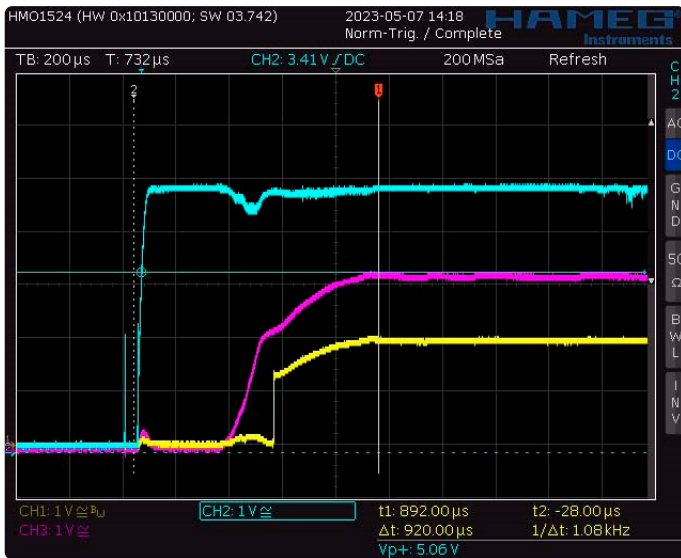
Figuur 3. Het inschakelproces van de Raspberry Pi Pico.

Tabel 1. Markering van de SOT32-behuizing en de bijbehorende I²C-adressen.

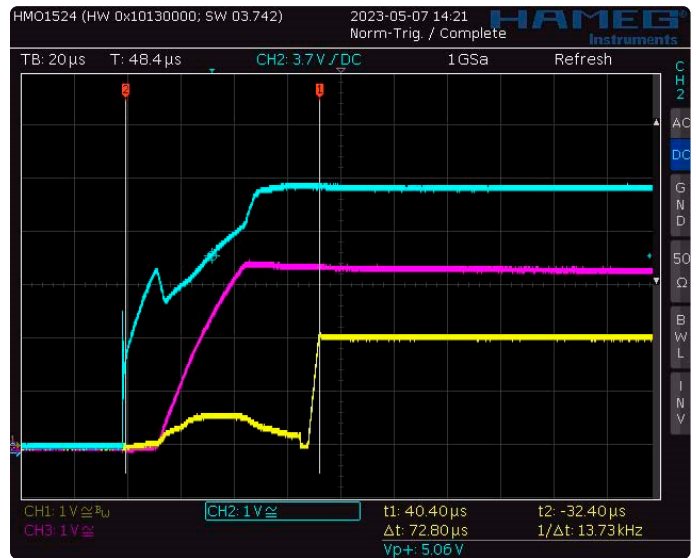
MCP4725-markering	I ² C optie	I ² C adres (A0=0)	Typenummer (MCP4725)
AJ	00	060H	A0T-E/CH
AP	01	062H	A1T-E/CH
AQ	10	064H	A2T-E/CH
AR	11	066H	A3T-E/CH



Figuur 4. Blokschema van de MCP4725 (bron: Microchip datasheet [2]).



Figuur 5. Inschakelen van het Pico-board met de MCP4725.



Figuur 6. Inschakelproces met een aparte lineaire regelaar voor de DAC.

De EEPROM is toegankelijk via de DAC; hij kan niet afzonderlijk worden aangesproken. De EEPROM wordt beschreven door twaalf databits tegelijk in het DAC-register en de EEPROM te kopiëren met een speciaal I²C-commando. Een configuratiebit bepaalt of alleen het DAC-register of ook de EEPROM moet worden beschreven. Als de MCP4725 naar de EEPROM schrijft, wordt het RDY/BSY-bit laag en blijft laag totdat het EEPROM-schrijfproces is voltooid. De datasheet [2] legt de schrijf- en leesprocessen in detail uit in hoofdstuk 6.

Inschakelgedrag met EEPROM

De spanningscurven in **figuur 5** tonen nog een inschakelproces in onze Pico-opstelling, maar nu met de EEPROM. De EEPROM is geprogrammeerd om de DAC een spanning van 2 V te laten leveren. Deze DAC-spanning (geel) is al ongeveer 1 ms na het inschakelen van de voedingsspanning (cyaan) stabiel! En een groot deel van deze vertraging is te wijten aan het feit dat de CPU-voeding van 3,3 V (paars) pas na 450 µs begint te stijgen en dan nog eens 400 µs nodig heeft voordat hij stabiel is. Voordat dit het geval is, kan de MCP4725 sowieso geen stabiele uitgangsspanning leveren, omdat de DAC de voedingsspanning als referentie gebruikt. In deze situatie, die al comfortabeler is dan de oorspronkelijke schakeling, zien we niet eens hoe snel de MCP4725 werkelijk kan zijn.

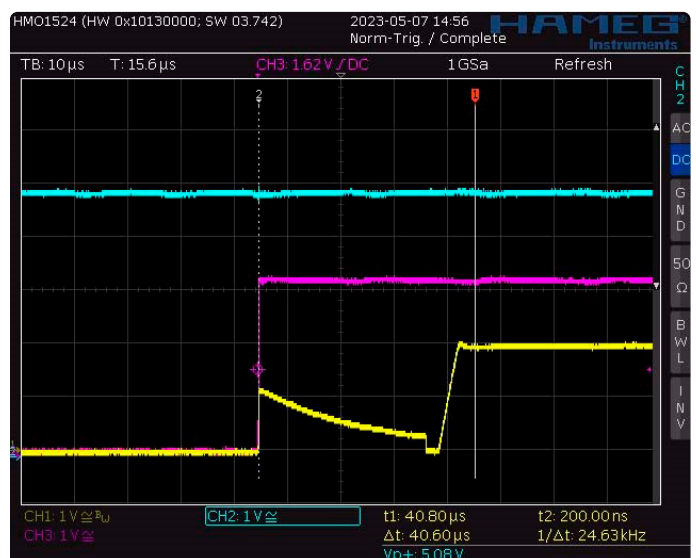
Snel inschakelen

Om deze vertraging te voorkomen en het maximale uit de DAC te halen, hebben we deze uitgerust met zijn eigen lineaire spanningsregelaar LF33ABV (zoals al getekend in figuur 1). Hierdoor ziet het inschakelproces eruit als in figuur 6. Nu is de 3,3V-spanning (paars) al ongeveer 40 µs na het inschakelen van de 5V-voeding (cyaan) stabiel. Voor de uitgangsspanning van de DAC van 2 V (geel) geldt dit na ongeveer 70 µs. Dat is al behoorlijk snel. Toch is de 'trage' toename van de voedingsspanning waarschijnlijk nog goed voor ongeveer 40 µs.

Om dit uit te zoeken is de voedingsspanning van de DAC afgenomen

van een GPIO-pin van de Raspberry Pi Pico. Aangezien de DAC een low power-IC is en normaal gesproken slechts 200 µA trekt, kan een GPIO-pin die stroom gemakkelijk leveren. Condensator C1 op de Adafruit MCP4725 BoB zou hier echter weer voor een langere stijgtijd verantwoordelijk zijn.

De MCP4725 is daarom gebruikt op een eenvoudige SOT32-6 adapterprint [4] zonder extra schakelingen (dus zonder R4...R6 en C1). Als alternatief kan een MCP4725-BoB [5] worden aangeschaft en kan de ontkoppelcondensator worden verwijderd. Het inschakelproces ziet er dan uit als in **figuur 7**. De 5V-spanning (cyaan) is al lange tijd stabiel. De firmware maakt vervolgens de GPIO-pin hoog, waarna de 3,3V-spanning op de MCP4725 (paars) zeer snel stijgt en vrijwel meteen stabiel is. Het duurt nu nog maar



Figuur 7. Inschakelen met een GPIO-pin en zonder C1.

ongeveer 40 μ s voordat de DAC de uitgangsspanning van 2 V (geel) stabiel levert. Dit is de 'echte' vertragingstijd van de DAC-EEPROM; hij kan nooit sneller zijn. Maar deze vertragingstijd zou voor de meeste toepassingen acceptabel moeten zijn.

We gebruiken de DAC zonder de normaal vereiste ontkoppelcondensator, maar dit bleek geen probleem op te leveren. We moeten er alleen voor zorgen dat de voedingsspanning van de MCP4725 zeer snel na het inschakelen beschikbaar is.

In dit artikel hebben we onderzocht hoe een opstartproces van een microcontrollersysteem met de Raspberry Pi Pico eruit ziet en hoe we ervoor kunnen zorgen dat de digitaal/analoo omzetter tijdig een correcte spanningswaarde levert. Wat we hierbij hebben ontdekt, kan meestal worden overgezet naar andere systemen. ◀

230351-03



Over de auteur

Martin Ossmann begon op 12-jarige leeftijd Elektor te lezen – en te knutselen natuurlijk. Na zijn studie elektrotechniek en na enkele jaren als ontwikkelingsingenieur te hebben gewerkt, werd hij professor aan de faculteit Elektrotechniek en Informatietechnologie van de Hogeschool Aken. Hij is niet alleen auteur van diverse wetenschappelijke publicaties, maar publiceert ook al meer dan drie decennia regelmatig schakelingen en softwareprojecten met veel technische knowhow in Elektor.

Vragen of opmerkingen?

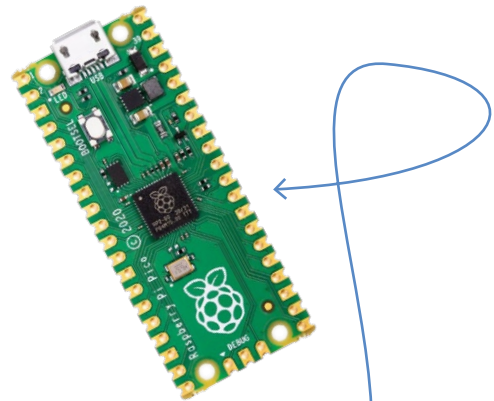
Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via ossmann@fh-aachen.de of naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.



Listing 1. Spanningswaarden naar de EEPROM schrijven (gedeelte).

```
void MCP4725DACout(int DACval){
    i2cBuffer[0]=0x40 ;
    i2cBuffer[1]=DACval>>4 ;
    i2cBuffer[2]=DACval<<4 ;
    int nn=i2c_write_blocking(i2c_default,i2cAdr,
    i2cBuffer,3,false) ;
    printf("nn=%d\n",nn) ;
}

void writeEEPtest(){
    printf("writeEEPtest()...\n") ;
    float DACvalVolts=2.0 ;
    int DACvalBin=voltToBin(DACvalVolts) ;
    printf("DACvalVolts=%10.3f Volts = %04XH
    \n",DACvalVolts,DACvalBin) ;
    i2cBuffer[0]=0x60 ; // write DAC and EEPROM
    i2cBuffer[1]=DACvalBin>>4 ;
    i2cBuffer[2]=DACvalBin<<4 ;
    int nn=i2c_write_blocking(i2c_default,i2cAdr,
    i2cBuffer,3,false) ;
    while( getFlag()==0 ){ sleep_us(10) ; }
    printf("EEPwrite complete!\n") ;
}
```



Gerelateerd product

> **Raspberry Pi Pico**
www.elektor.nl/19562

WEBLINKS

- [1] Download testprogramma: <https://www.elektormagazine.nl/230351-03>
- [2] MCP4725-datasheet (Microchip): <https://www.microchip.com/en-us/product/mcp4725>
- [3] Breakout-board van Adafruit: <https://www.adafruit.com/product/935>
- [4] SOT23-6 adapter: <https://www.reichelt.de/de/en/adapter-sot23-6-1-00-mm-pitch-rm-2-54-mm-re-910-p167707.html>
- [5] Eenvoudig breakout-board (met ontkoppelcondensator!): <https://www.sparkfun.com/products/12918>

Fnirsi LCR-ST1

smart LCR-meetpincet

Harry Baggen (Nederland)

Onlangs brachten zowel Zoyi als FNIRSI betaalbare slimme pincetten uit die ook inductie kunnen meten, en dat voor slechts een paar tientjes. In deze review bekijken we wat de FNIRSI LCR-ST1 kan doen voor die lage prijs en beoordelen we de praktische bruikbaarheid ervan.



Figuur 1. De FNIRSI LCR-ST1 is niet alleen bruikbaar voor het meten van SMD's, maar ook voor through-hole componenten.

Het identificeren en meten van passieve SMD-componenten is vaak een uitdaging. Deze onderdelen zijn klein en het is niet altijd aan de vorm te zien of het een weerstand, condensator of spoel betreft (figuur 1). Om het identificeren en meten van SMD's gemakkelijker te maken, hebben enkele fabrikanten een paar jaar geleden 'slimme pincetten' geïntroduceerd – een miniatuur-multimeter [1] met pincetvormige probes die om een SMD-component kunnen worden geklemd om het te meten. De originele modellen waren (en zijn nog steeds) vrij duur, maar kort daarna verschenen er betaalbare Chinese versies met een vergelijkbaar ontwerp. Het grootste nadeel van deze goedkopere versies was dat deze (op enkele uitzonderingen na) alleen weerstand en capaciteit konden meten, geen inductie.

De FNIRSI LCR-ST1: veel meter voor weinig geld

Als u de verpakking van de FNIRSI LCR-ST1 [2] opent, is het bijna niet te geloven wat u krijgt voor nog geen 40 euro. In een net, gevoerd etui vindt u de meetpincet zelf, twee extra probes met een gebogen punt, een USB-C kabel en een magnetisch plaatje om de pincet een vast plaatsje te geven. Er zit ook een compacte handleiding in het Chinees en Engels in de verpakking die, hoewel beknopt, alle essentiële informatie bevat die nodig is om het instrument te gebruiken (figuur 2).

De behuizing van de meetpincet meet ongeveer 6×2,8×1,9 cm en

is voorzien van een 1,14inch-kleurendisplay. Twee meetprobes, ongeveer 9 cm lang, steken uit het smalle uiteinde. De metalen punten zitten aan de uiteinden geschroefd maar u kunt deze zonder gereedschap los- of vastdraaien waardoor u gemakkelijk kunt wisselen naar de andere probes die in de set zitten.



Figuur 2. Dit krijgt u allemaal voor nog geen 40 euro.

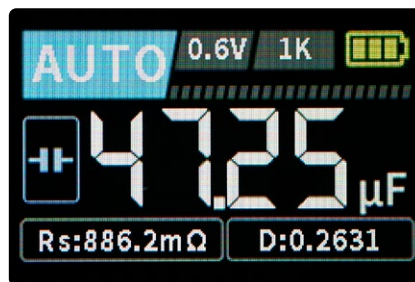


Figuur 3. Met de driewegschakelaar aan de zijkant kunnen de meeste instellingen van het apparaat gewijzigd worden.

Het aantal knoppen is minimaal. Naast het display zitten een aan/uit- en een memory-knop. Aan de zijkant zit een driewegschakelaar die naar links en rechts kan bewegen en ingedrukt kan worden (figuur 3). De functies ervan komen later in detail aan de orde. De USB-C-poort aan de smalle kant maakt het mogelijk om de LCR-ST1 op een PC aan te sluiten en om de interne accu op te laden.

Mogelijkheden van de FNIRSI LCR-ST1

Wanneer de LCR-ST1 wordt ingeschakeld, start deze in automatische modus en identificeert of het te testen onderdeel een weerstand, condensator of spoel is. De primaire meting is prominent zichtbaar in het midden (maximaal vier cijfers), de serie-weerstand (R) en dissipatiefactor (D) staan eronder in kleinere tekst (figuur 4). De meetspanning (boven) kan worden ingesteld op 0,6 V (standaard) of 0,3 V met behulp van de driewegschakelaar. Die lagere spanning is handig voor het meten in een schakeling omdat diode-overgangen dan niet worden geactiveerd. Het apparaat geeft verder ook de meetfrequentie weer. U kunt die met dezelfde schakelaar instellen op 1 kHz (standaard), 100 Hz



Figuur 4. Het heldere kleurendisplay toont onder andere de gemeten waarde, de serie-weerstand en de dissipatiefactor.

of 10 kHz. Ik had niet zo veel mogelijkheden verwacht bij zo'n betaalbaar meetapparaat.

Metingen bijhouden

Meetwaarden worden geregistreerd met de memory-knop. Het apparaat slaat ze dan op in zijn geheugen als CSV-bestand (figuur 5). Deze metingen zijn later op een PC te bekijken via de USB-aansluiting. Dezelfde USB-aansluiting maakt ook firmware-upgrades mogelijk. Als u de geheugenknop ingedrukt houdt, wordt het menu geopend waarin instellingen kunnen worden aangepast, zoals de helderheid van het scherm, het zoemervolume en de tijd waarna het apparaat zichzelf automatisch uitschakelt als het niet gebruikt wordt. Het scherm is vrij helder en ik heb de helderheid iets verlaagd voor normaal gebruik.

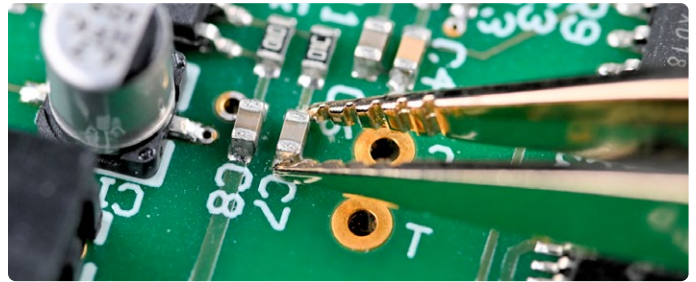
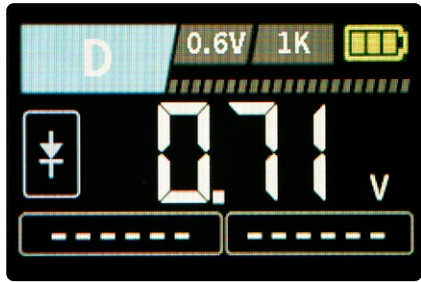
Automatische en handmatige modus

Naast de automatische meetmodus kunnen weerstands-, capaciteits- of inductiemeting ook handmatig gekozen worden met behulp van de driewegschakelaar. Als vierde mogelijkheid kan de LCR-ST1 diodes meten. Vanwege de lage meetspanning kunnen alleen gewone

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	No.	Type	Level(Vrms)	Frequency(Hz)	Value(R nF uH V)	Rs(R)	Q	D	Z(R)	X(R)
2	1	C	6	1000	10081742	9043	1745621	57	1573663	1578645
3	2	C	6	1000	10127062	9855	1594783	63	1566714	1571581
4	3	C	6	1000	10206804	4415	3531644	28	1554406	1559302
5	4	C	6	1000	101845	566898	2756621	36	155570918	156272246
6	5	C	6	1000	48851084	2254	1445650	69	325804	325796
7	6	C	6	10000	49499492	381	843913	118	32824	32153
8	7	C	6	100	49496470	1221	26334824	4	3196725	3215481
9	8	C	6	100	4140949687	1719	223586	447	38919	38434
10	9	C	6	1000	4193671562	730	51968	1924	4062	3795
11	10	L	6	1000	975737	1724	35552	2813	6627	6131
12	11	L	6	1000	48425845	92384	32935	3036	71105	304269
13	12	L	6	1000	101552090	197953	32234	3102	668363	638071
14	13	C	6	1000	41830462500	1051	3620	27628	1398	380
15	14	C	6	1000	48592765000	439	7464	13397	661	328
16	15	C	6	100	41283455000	706	54597	1832	4129	3855
17	16	C	6	1000	10127061	9573	1641630	61	1566727	1571581
18	17	C	6	1000	472154063	6589	51160	1955	34794	33708
19	18	L	6	1000	101610869	197369	32348	3091	668251	638440
20	19	L	6	1000	101573809	197624	32294	3097	668373	638207
21	20	C	6	1000	100283	51680	30709126	3	158705547	158705537
22	21	DIODE	6	1000	7116	139762246	539	185687	139441670	7526749
23	22	R	6	1000	101369863	101369863	0	417902148	101369863	2426

Figuur 5. De gemeten waarden worden opgeslagen in het interne geheugen en kunnen als CSV-bestand in Excel worden geïmporteerd.

Figuur 6. Bij het meten van diodes wordt ook de polariteit van de diode tussen de meetpennen weergegeven.



Figuur 7. De meetpunten zijn niet heel scherp, maar kunnen eventueel gemakkelijk scherper gemaakt worden.

diodes gemeten worden, geen LED's. Een uniek kenmerk bij diodemetingen is dat het display ook de polariteit van de diode weergeeft ongeacht de oriëntatie omdat het apparaat deze polariteit automatisch detecteert met behulp van een wisselspanning (figuur 6).

De FNIRSI LCR-ST1 in de praktijk

De LCR-ST1 is met 40 gram licht van gewicht; hij ligt prettig in de hand. Hij is ongeveer één seconde na het inschakelen al klaar voor gebruik. Het display is helder, met duidelijke, gemakkelijk en vanuit ruime hoeken af te lezen waarden. De bediening is intuïtief en wordt tijdens gebruik snel duidelijk, ook zonder de handleiding. De metalen punten van de probes zijn vrij scherp, hoewel sommige gebruikers ze misschien nog scherper willen hebben voor het meten van componenten die op een print zijn gesoldeerd – dat is eenvoudige aan te passen met een vijltje (figuur 7).

Metten in een schakeling

Ik heb diverse componenten los getest en een aantal rechtstreeks op een print; dat ging sneller en efficiënter dan bij het gebruik van de SMD-meetpincet van mijn grote LCR-meter. Bij het meten van componenten op een print is het handig om het schema bij de hand te hebben om te weten welke onderdelen worden gemeten. In de automatische modus identificeerde de meter vrijwel alle componenten betrouwbaar. Through-hole componenten kunnen ook goed gemeten worden met het apparaat: de groeven aan de binnenkant van de probes houden aansluitdraden, zoals die van condensatoren, goed vast tijdens het meten zonder dat ze wegglijden.

Ingebouwde kalibratiefunctie

De meetpincet heeft een ingebouwde kalibratiefunctie om de interne weerstand van de probes te compenseren. Kalibratie gebeurt door de probes samen te knijpen en kort op de aan/uitknop te drukken, maar ik merkte niet veel effect. Toen de probes elkaar raakten gaf de meter een waarde van enkele milliohm aan en na de kalibratie was dat nauwelijks anders – een opmerkelijk lage weerstand van 2 tot 5 mΩ voor zo'n simpel apparaat. Er lijkt nog een extra kalibratiemenu te zijn, te openen door de driewegschakelaar naar links te drukken terwijl het apparaat ingeschakeld wordt, maar de exacte werking daarvan is niet gedocumenteerd.

Nauwkeurigheid van de FNIRSI LCR-ST1

Om de nauwkeurigheid te testen, heb ik een aantal weerstanden, condensatoren en spoelen gemeten en de meetresultaten vergeleken

met die van mijn 'grote' LCR-meter (nauwkeurig tot 0,5%). Ik was verrast door de resultaten: de meeste resultaten lagen binnen 1% van de meetwaarden van de grotere meter. Alleen bij grotere spoelen en condensatoren, zoals een elektrolytische condensator van 4.700 µF, was de nauwkeurigheid minder, maar bleef toch netjes binnen de specificaties van FNIRSI rond 5%. Metingen van serieweerstand en dissipatiefactor waren ook indrukwekkend nauwkeurig, met als klein nadeel dat het pincet de dissipatiefactor (D) toont voor spoelen in plaats van de kwaliteitsfactor (Q) – waarschijnlijk bedoeld als 1/Q. Dit is iets wat in de firmware zou kunnen verbeteren, maar over het algemeen ben ik erg blij met deze onverwacht hoge nauwkeurigheid.

Eindindruk

De FNIRSI LCR-ST1 is een zeer handig instrument, essentieel voor iedereen die veel met SMD's werkt. Het apparaat identificeert componenten met een indrukwekkende nauwkeurigheid en kan dat doen met drie verschillende meetfrequenties en twee spanningen, waardoor het ook geschikt is voor metingen in een schakeling. Through-hole componenten zijn ook goed te meten. Hoewel ik een 'grote' LCR-meter heb, is dit apparaat veel gemakkelijker voor snelle metingen of controles – vooral ook gezien de ongelooflijk lage prijs. Het krijgt een vaste plaats in mijn hobbylab! ◀

vertaling: Adrie Kooijman — 240657-03

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.nl.



Gerelateerde producten

- > **Smart SMD Tweezers (LCR/ESR Tester)FNIRSI LCR-ST1**
www.elektor.nl/20984
- > **LCR-Meter UNI-T UT622E**
www.elektor.nl/20782
- > **LCR-Meter UNI-T UT603**
www.elektor.nl/20622

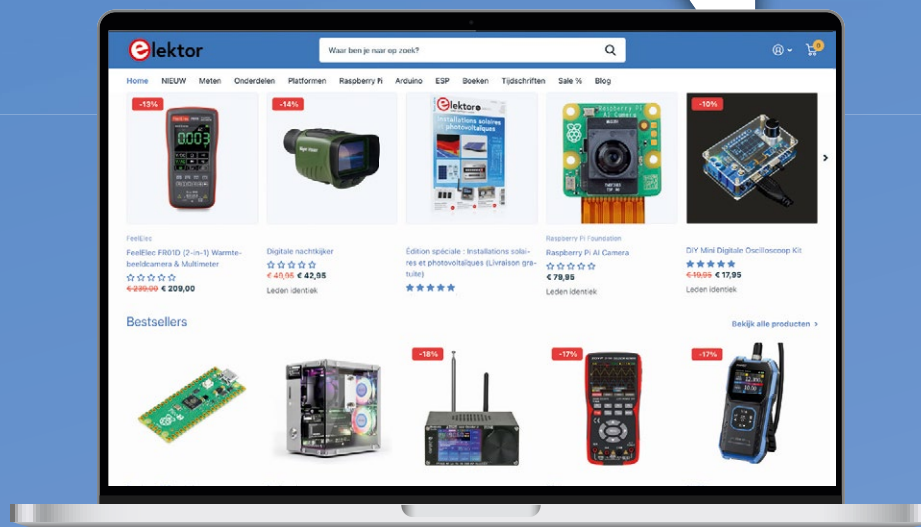
WEBLINKS

[1] J.-F. Simon, "LCR-meter: De UNI-T UT603 (Review)", elektormagazine.nl, januari 2024:

<https://www.elektormagazine.nl/review/lcr-meter-de-uni-t-ut603-review>

[2] Fnirsi LCR-ST1: <https://www.elektormagazine.nl/review/fnirsi-lcr-st1-smart-lcr-meetpincet-review>

Wat is uw mening?



Bij Elektor bieden we meer dan alleen elektronica - we creëren een ervaring van kwaliteitsproducten en uitzonderlijke klantenservice, ondersteund door de passie van onze community.

Deel uw mening op
www.elektor.nl/pages/customer-reviews



Zijn prijs waard !!

Werkt prima, snelle levering, goed verpakt, altijd al tevreden geweest van Elektor!



Geleverd zoals beloofd

Het product is uiteraard een zeer goed product, de bestelling werd omwille van de beschikbaarheid later uitgevoerd maar kwam toch vroeger dan verwacht. Prima shop!



Prima!

Snel geleverd, goed verpakt, prima product. Wat wil je nog meer? Zal zeker vaker bestellen bij deze winkel

Raspberry Pi- gebaseerd test- en meetlab

als eerste: de ADC

Günter Spanner (Duitsland)

De combinatie van een Raspberry Pi (4 of 5) en een Raspberry Pi Pico heeft de potentie om een heel ‘instrumentenpark’ aan meetapparatuur zoals V/A/ Ω -meters, functiegeneratoren, RF-generatoren, oscilloscopen of transiënt recorders, maar ook frequentietellers te vervangen. Een onmisbaar element in bijna al deze testapparatuur is de analoge/digitaal-converter (ADC). In dit artikel kijken we naar het proces van het implementeren van ADC-functionaliteit op de ‘Pi’s’ van de grond af.

Noot van de redactie: Dit artikel is een gedeelte uit het Elektor-boek “Raspberry Pi 4 or 5 and Pico”. Het is opgemaakt en licht bewerkt overeenkomstig de conventies en paginaopmaak van Elektor Magazine. De auteur en redactie helpen u graag met vragen. Contactgegevens staan in het kader **Vragen of opmerkingen**.

In eerdere hoofdstukken van het boek zijn methoden voor het weergeven van meetresultaten behandeld. Hieronder wordt verder ingegaan op mogelijke zelfbouw-apparatuur.

Van analoog naar digitaal: de basis

De ADC in de Raspberry Pi Pico heeft de volgende specificaties:

- › resolutie: 12 bit
- › externe ingangen: 3
- › conversietijd: 2 μ s, equivalent met 500 kSamples/s
- › convertertype: SAR (successive approximation)



De Pico ondersteunt intern vijf A/D-converterkanalen. Er zijn er echter maar drie extern beschikbaar. Het vierde analoge kanaal (ADC3) kan worden gebruikt om deingangsspanning V_{SYS} te monitoren. Het vijfde kanaal (ADC4) is verbonden met de interne temperatuursensor. **Tabel 1** toont de toewijzing van de ADC-ingangen aan de betreffende pinnen.

Tabel 1. Van ADC-ingang naar I/O-pin.

ADC-kanaal	I/O-pin
ADC0	GP26
ADC1	GP27
ADC2	GP28

De ADC-converters leveren 12bit-waarden van 0 tot 4095 (dat is $2^{12} - 1$). Deze waarden worden intern door het systeem met 16 vermenigvuldigd. Daarom zijn ze beschikbaar als 16bit-getallen met een maximale waarde van 65.536. In principe kunnen de ADC-ingangen van de Pico spanningen inlezen tussen 0 en 3,3 volt, die door de ADC worden omgezet in digitale waarden.

Bij het uitlezen van de ADC's met MicroPython worden de 12bit-datawoorden geconverteerd naar een 2-byte-waarde met een breedte van 16 bit. Dit komt overeen met een waardebereik van 0 tot 65.535 ($2^{16} = 65.536$ discrete waarden).

Het programma `ADC_test.py` in **listing 1** toont de ruwe waarden van alle ADC-kanalen in de console. Alle programma's die hier worden besproken, zijn gratis te downloaden via het gedeelte 'Downloads' op de productpagina van het boek op elektor.nl [1]. Als de ingangen niet zijn aangesloten, verschijnen er willekeurige waarden voor de kanalen 0, 1 en 2. Het vierde kanaal geeft een waarde voor V_{SYS} , terwijl het vijfde kanaal de interne temperatuur van de



RP2040-chip geeft. Deze temperatuurwaarde moet echter nog worden omgezet naar graden celsius. Om echte meetwaarden te krijgen, kunnen de ingangen worden aangesloten op potmeters, zoals in **figuur 1** is weergegeven. Op die manier kunnen aan elke ingang afzonderlijke spanningen worden gegeneerd. De uitvoer in de shell geeft de resultaten weer zoals getoond in **figuur 2**. De waarden worden hier puur numeriek gegeven, maar u kunt ze ook grafisch weergeven in de plotter:

```
...
while True:
    read0 = adc0.read_u16()
    read1 = adc1.read_u16()
    read2 = adc2.read_u16()
    read3 = adc3.read_u16()

    print(read0, read1, read2, read3)
    sleep(1)
```

Elk kanaal krijgt automatisch zijn eigen grafiek, zie **figuur 3**.

Externe voeding via VSYS

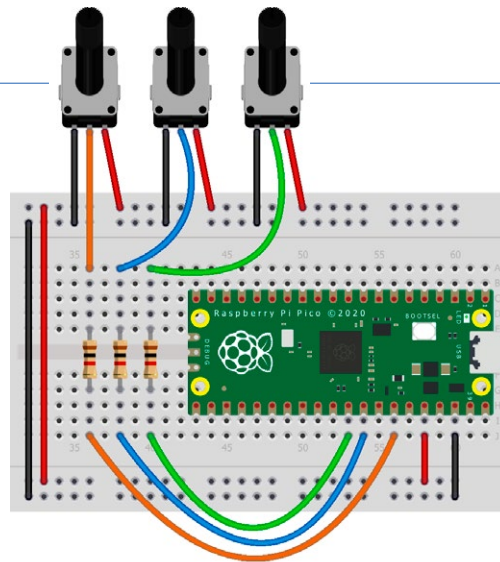
Als u de Pico als een stand-alone systeem wilt gebruiken zonder een USB-verbinding met een PC, dan kan er een externe spanning op VSYS gezet worden. Deze spanning kan worden gemeten met het interne ADC-kanaal, `ADC3()`. Omdat er in dit geval geen verbinding is met de PC, kunnen de waarden niet worden weergegeven in de Thonny IDE. Daarom moet u een direct aangesloten display gebruiken. Een goede keuze hiervoor is het OLED-display, zodat alle ADC-waarden kunnen worden bekeken met het programma `ADC_to_OLED.py` in **listing 2**.

Het programma moet hergenoemd worden naar `main.py` zodat het automatisch start na een stroomonderbreking. Vervolgens kan de Pico via VSYS gevoed worden met een externe spanning variërend van 1,8 V tot 5,5 V. De volgende spanningsbronnen zijn hiervoor geschikt:

- > externe voeding
- > USB-lader (5 V)
- > batterijen, bijvoorbeeld 2× 1,5 V of 3× 1,5 V
- > oplaadbare NiMH-batterijen, bijvoorbeeld 2× 1,2 V of 3× 1,2 V of 4× 1,2 V
- > Li-ion accu's (3,7 V nominaal)

De momentele ingangsspanning wordt nu samen met andere waarden weergegeven op het OLED-display, wat monitoring mogelijk maakt. **Figuur 4** toont de werking met een USB-aansluiting en twee 1,2V-batterijen (nominaal 2,4 V).

Omdat de Pico geen geïntegreerde digitaal/analogue-converter (DAC) heeft, kan de ADC niet direct getest



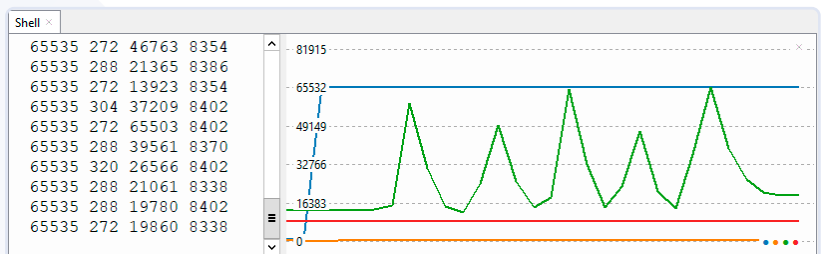
Figuur 1. Een snelle opbouw op een breadboard om de ADC-kanalen te testen.

```
Shell x
ADC0: 1072
ADC1: 256
ADC2: 11538
ADC3: 8402

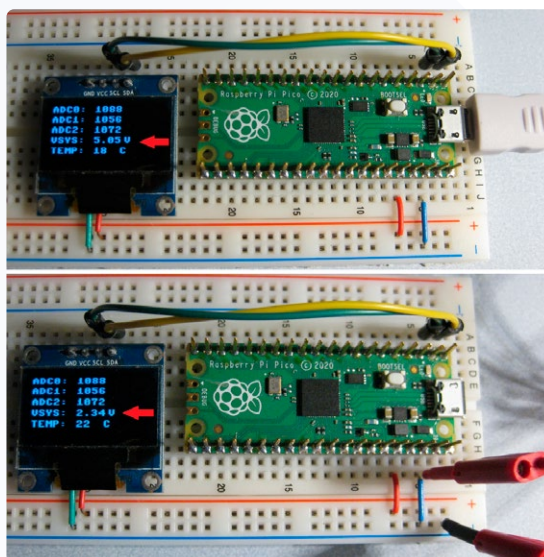
ADC0: 1088
ADC1: 240
ADC2: 11474
ADC3: 8418
```

Figuur 2. Waarden gemeten door de ADC-kanalen.

Figuur 3. Grafische uitvoer van drie analoge kanalen.



Figuur 4. Gebruik van de Pico met externe voedingen.



Figuur 4. Gebruik van de Pico met externe voedingen.



Listing 1. ADC_test.py.

```
adc0 = ADC(0)
adc1 = ADC(1)
adc2 = ADC(2)
adc3 = ADC(3)
adc4 = ADC(4)

while True:
    print('ADC0:', adc0.read_u16())
    print('ADC1:', adc1.read_u16())
    print('ADC2:', adc2.read_u16())
    print('ADC3 (VSYS):', adc3.read_u16())
    print('ADC4 (TEMP):', adc4.read_u16())

    print('=====')
    sleep(1)
```



Listing 2. ADC_to_OLED.py.

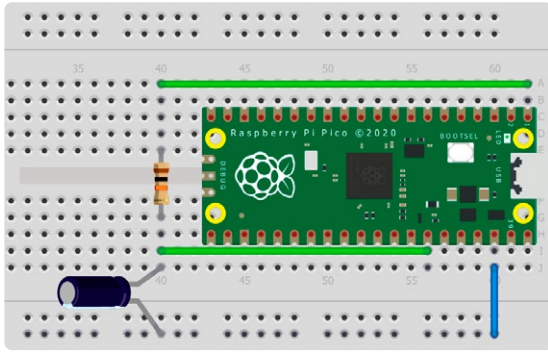
```
from machine import ADC
from machine import Pin, I2C, ADC
from ssd1306 import SSD1306_I2C
from time import sleep
xmax=128
ymax=64
cf = 3.3 / (65535)
oled = SSD1306_I2C(xmax, ymax, I2C(0, scl=Pin(1), sda=Pin(0), freq=400_000))
adc0 = ADC(0)
adc1 = ADC(1)
adc2 = ADC(2)
adc3 = ADC(3)
adc4 = ADC(4)
while True:
    print('ADC0:', adc0.read_u16())
    print('ADC1:', adc1.read_u16())
    print('ADC2:', adc2.read_u16())
    print('ADC3 (VSYS):', round(adc3.read_u16()*cf*12,2), 'V')
    print('ADC4 (TEMP):', int(33-((adc4.read_u16()*cf)-0.706)/0.001721), '°C')

    print('=====')
    sleep(1)
    oled.fill(0)

    oled.text('ADC0:',0,0,1)
    oled.text('ADC1:',0,12,1)
    oled.text('ADC2:',0,24,1)
    oled.text('VSYS:',0,36,1)
    oled.text('TEMP:',0,48,1)

    oled.text(str(adc0.read_u16()),50,0,1)
    oled.text(str(adc1.read_u16()),50,12,1)
    oled.text(str(adc2.read_u16()),50,24,1)
    oled.text(str(round(adc3.read_u16()*cf*12,2)),50,36,1)
    oled.text('V',85,36,1)
    oled.text(str(int(33-((adc4.read_u16()*cf)-0.706)/0.001721)),50,48,1)
    oled.text('C',80,48,1)

    oled.show()
```



▲ *Figuur 5. ADC-testschakeling met laagdoorlaatfilter.*

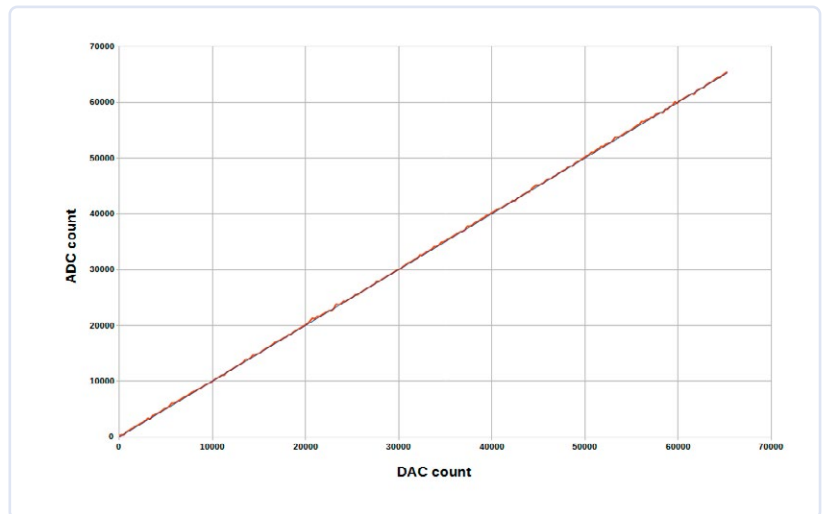
```
Shell x
>>> %Run -c $EDITOR_CONTENT
Discharge...
Starting...
0 256
256 448
512 720
768 896
1024 1152
1280 1376
1536 1632
```

▲ *Figuur 6. Waarden uitgevoerd door het systeem (DAC-telling en ADC-waarde).*

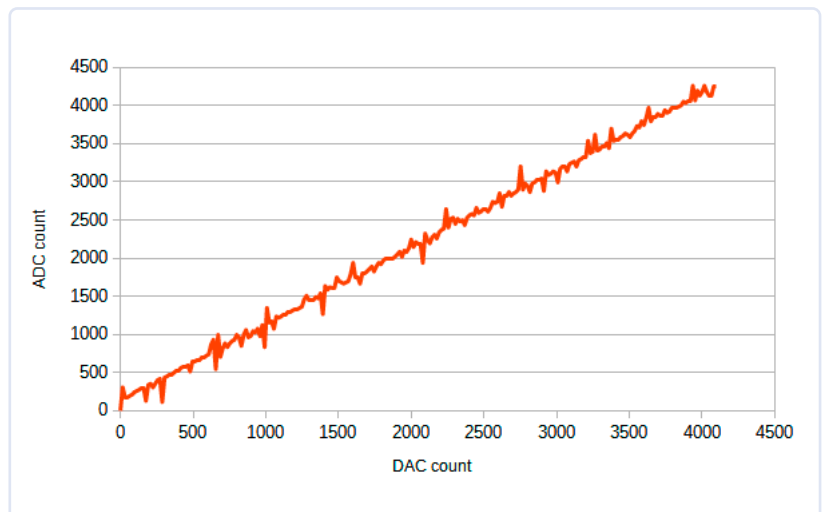
worden met een softwarematig gegenereerde analoge spanning. De PWM-functie biedt echter een oplossing. Met een laagdoorlaatfilter kan een analoge spanning worden gegenereerd. Een geschikt laagdoorlaatfilter kan bestaan uit een weerstand van 10 k Ω en een elektrolytische condensator van 100 μ F (**figuur 5**). Het programma `PWM_to_ADC.py` in **listing 3** genereert een langzaam oplopende PWM-spanning op pin 0. Deze spanning wordt afgevlakt met een laagdoorlaatfilter en gemeten met ADC(2). Na een ontladperiode van 100 seconden ten gevolge van de elektrolytische condensator van 100 μ F worden de meetwaarden als tabel weergegeven in de Thonny-shell (**figuur 6**). De gegevens kunnen worden gekopieerd en in een spreadsheet-programma zoals LibreOffice Calc of Excel worden geplakt en grafisch worden weergegeven zoals geïllustreerd in **figuur 7**. De ADC van de Pico vertoont een goede lineariteit in vergelijking met andere microcontrollers. Bij nader onderzoek van de lagere ADC-waarden (**figuur 8**) is echter duidelijk dat er een aanzienlijk ruisniveau aanwezig is. Bovendien vertoont de converter een zekere offset. Voor nauwkeurige resultaten moeten methoden zoals filteren of middelen worden toegepast om de ruis te verminderen. Bovendien moet de offset softwarematig worden gecorrigeerd voor nauwkeurige metingen.

ADC in de praktijk: een computer-voltmeter

De analoge ingangen van de Pico zijn zeer geschikt voor het meten van spanningen. Hun enige beperking is dat ze maar tot maximaal 3,3 V kunnen meten zonder externe schakelingen. Dit is echter geen groot probleem, omdat het meetbereik praktisch



▲ *Figuur 7. ADC-testresultaten.*



▲ *Figuur 8. ADC-testresultaat voor lage spanningen.*



Listing 3. PWM_to_ADC.py.

```
import time
from machine import Pin, PWM

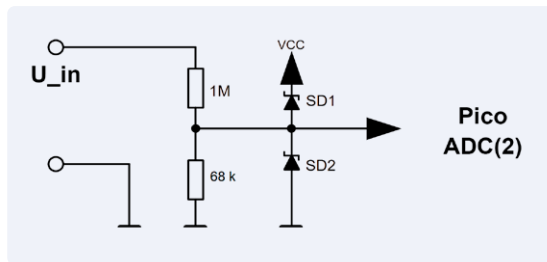
print('Discharge...')

adcPin = Pin(28, Pin.IN)
pwm0 = PWM(Pin(0))
pwm0.freq(20000)
pwm0.duty_u16(0)
time.sleep(100)

print('Starting...')

for dacVal in range(0,65540,256):
    pwm0.duty_u16(dacVal)
    time.sleep(1)
    print(dacVal, machine.ADC(2).read_u16())
```

Figuur 9. Spanningsdeler voor het uitbreiden van het meetbereik van de voltmeter.



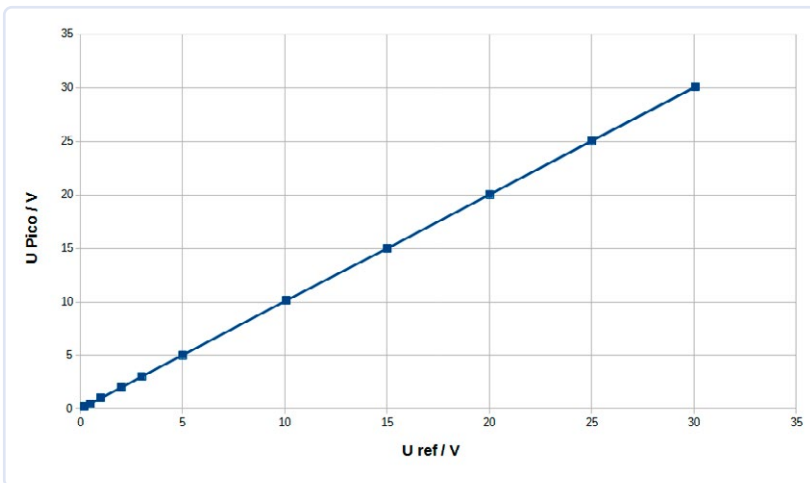
```
from machine import ADC, Pin
import time
```

```
R1 = 68
R2 = 1000
```

```
conversion_factor=3.3/(1<<16)*(R1+R2)/R1
adc=ADC(2)
```

```
while True:
    print(adc.read_u16()*conversion_factor)
    time.sleep(1)
```

Als extra beveiliging tegen overbelasting kunnen Schottky-diodes (zoals de BAT41) worden geïnstalleerd zoals getoond in figuur 9. SD1 leidt overspanningen af, terwijl SD2 bescherming biedt tegen omgekeerde polariteit van de ingangsspanning. Door een gekalibreerde referentie-voltmeter te gebruiken, is een hoge mate van nauwkeurigheid mogelijk. **Tabel 2** toont een vergelijking van meetwaarden tussen een gekalibreerde bench-voltmeter en de Pico-voltmeter. Grafisch kan dit worden weergegeven zoals in **figuur 10**.



Figuur 10. Kalibratiegrafiek van de Pi-voltmeter.

onbeperkt kan worden uitgebreid met een eenvoudige spanningsdeler. **Figuur 9** toont een geschikte schakeling. De spanningsdeler, bestaande uit een weerstand van 1 MΩ en een van 68 kΩ, breidt het meetbereik al uit tot meer dan 50 V.

Spanningen hoger dan 50 V komen zelden voor in moderne elektronische schakelingen. Bovendien moet u bij dergelijke spanningen gebruik maken van meetapparatuur die gecertificeerd is op veiligheid.

Waarschuwing: spanningen hoger dan 50 V kunnen onder bepaalde omstandigheden levensbedreigend zijn.

De deilverhouding kan voor de gegeven weerstanden als volgt worden berekend:

$$U_o = R_1 / (R_1 + R_2) = 68 \text{ k}\Omega / 1068 \text{ k}\Omega = 0,0637$$

Zo wordt een ingangsspanning van 50 V gereduceerd tot een veilige 3,18 V en kan deze worden gemeten met de interne referentie.

Het effect van de spanningsdeler moet worden meegenomen in de software. De kalibratiefactor 'cal' is hiervoor verantwoordelijk. Deze bevat zowel de factor van de spanningsdeler als een extra factor (0,94 in de voorbeeld-sketch verderop) die rekening houdt met de tolerantie van de referentie-spanningsbron en de weerstanden.

Tabel 2. Vergelijking van metingen: gekalibreerde bench-voltmeter vs. Pico-voltmeter.


U_referentie [V]	U_Pico [V]
0,202	0,20
0,498	0,48
1,002	1,01
2,004	1,99
3,006	3,02
5,021	5,03
10,082	10,14
15,020	15,01
20,018	20,05
25,011	25,06
30,082	30,11

Het kalibreren van de voltmeter met de kalibratiefactor wordt 'softwarematige kalibratie' genoemd. Als alternatief kan ook een hardwarematige kalibratie worden uitgevoerd. Hiervoor moet de schakeling worden uitgebreid met een potmeter. Instelpotmeters zijn zeer geschikt voor deze taak. Deze componenten kunnen zeer gevoelig en nauwkeurig worden afgesteld en hebben ook een relatief goede stabiliteit op de lange termijn.

Opnieuw wordt een vergelijking gemaakt met een gekalibreerde referentiespanningsmeter. Maar deze



keer wordt in plaats van het aanpassen van een parameter in het programma, de instelpotmeter aangepast totdat de Pi-voltmeter de juiste waarde weergeeft. Het voordeel van deze methode is dat er voor herkalibratie geen nieuwe softwareversie in de microcontroller geladen hoeft te worden. In plaats daarvan kan er periodiek eenvoudig een kalibratie worden uitgevoerd of bij specifieke omgevingscondities (bijvoorbeeld zeer hoge of zeer lage temperaturen). Het nadeel is echter dat er een extra component nodig is. Bovendien introduceren potmeters, als elektromechanische componenten, altijd extra drift, wat betekent dat omgevingsinvloeden veranderingen in de elektrische parameters kunnen veroorzaken, waardoor de stabiliteit van de kalibratie op de lange termijn afneemt.

Als de gekozen potmeter een totale weerstand van 1 k Ω heeft, is een instelbereik van ongeveer 5% van de gemeten waarde mogelijk. Hogere potmeterwaarden kunnen grotere instelbereiken opleveren, maar met een geringere instelnaauwkeurigheid. 



vertaling: Jan Mulder — 240390-03

Vragen of opmerkingen?

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



Gerelateerde producten

-  **Günter Spanner, Raspberry Pi 4 or 5 and Pico (Elektor 2024, boek)**
www.elektor.nl/20828
-  **Günter Spanner, Raspberry Pi 4 or 5 and Pico (Elektor 2024, e-boek)**
www.elektor.nl/20829

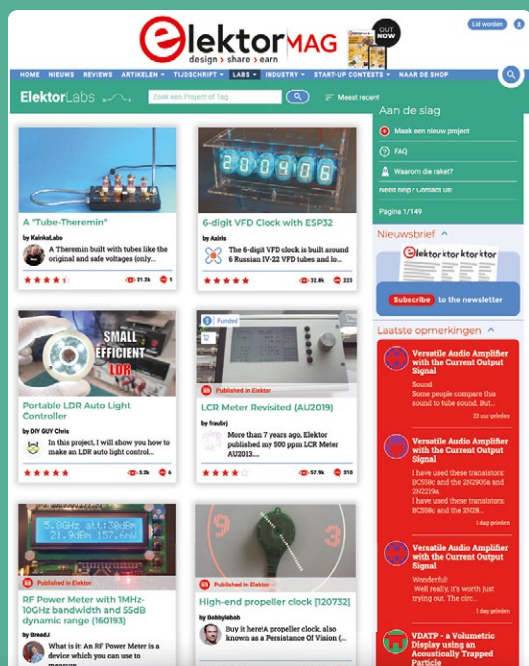
WEBLINK

- [1] Software bij "Raspberry Pi 4 or 5 and Pico":
<https://www.elektor.nl/products/raspberry-pi-4-or-5-and-pico>

Start uw elektronica-innovaties met

ElektorLabs

- Gratis publicatie van uw projecten
- Support van experts
- Samenwerkingsmogelijkheden
- Toegang tot exclusieve bronnen
- Publicatie in Elektor Magazine mogelijk



Deel nu uw projecten!

www.elektormagazine.nl/e-labs



Elektronische belasting- weerstand

met onderdelen die u
waarschijnlijk hebt liggen

Peter Grundmann (Duitsland)

Als u accu's of zonnepanelen wilt testen, hebt u een belastingweerstand nodig. Vaste weerstanden zijn goedkoop, maar vaak onpraktisch in gebruik. Met een beetje elektronica kunt u niet alleen een belasting simuleren, maar ook handige extra functies implementeren.

Als liefhebber van elektrisch aangedreven modelvliegtuigen, heb ik veel te maken met accu's die ik wil testen of juist wil ontladen. Maar ook bij veel doe-het-zelf elektronica-projecten, zoals voedingen, rijst vaak de vraag naar de prestaties. Haalt de stroombron de beoogde maximale stroomsterkte zonder spanningsval? Deze en soortgelijke of vragen kunnen worden beantwoord met vaste weerstanden, maar u merkt al snel dat u er dan heel veel nodig hebt. Ook is een goede



constructie van zo'n belastingweerstand essentieel, vooral bij grotere vermogens, om veilig gebruik te garanderen.

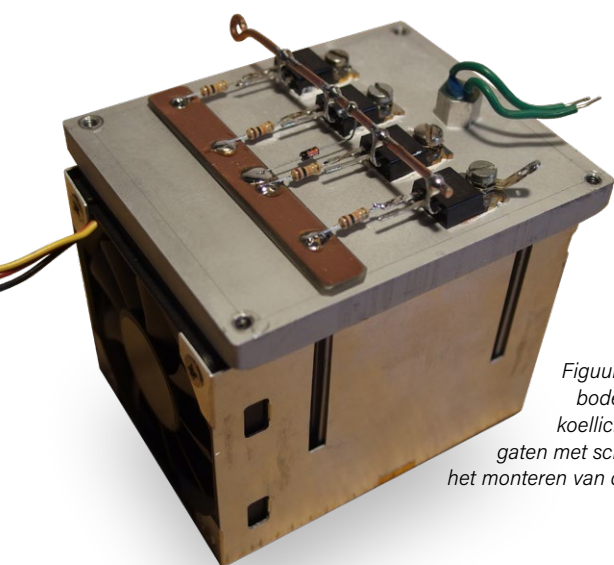
Tijdens mijn zoektocht naar een elegante oplossing kwam ik op internet een suggestie tegen die een deel van het probleem leek op te lossen [1]. Alleen het hart van de schakeling was echter gedocumenteerd; niet alleen een voeding maar ook instructies voor de eigenlijke implementatie ontbreken.

Het idee is echter eenvoudig en gemakkelijk uit te leggen. Een operationele versterker vergelijkt de gewenste spanning (doelspanning) met de werkelijke waarde en stuurt FET's aan die als belastingweerstand fungeren. Het geheel is dus een klassieke regelschakeling. Als u de spanning over een weerstand in het belastingschakeling als referentiewaarde neemt, kunt u de stroom constant houden. Als u overschakelt op de spanning over de belasting, kunt u een constante spanning bereiken op de aansluitingen van de belasting. Het voordeel van het gebruik van FET's in plaats van bipolaire transistoren is dat er geen stroom vloeit die de meting van de belastingstroom zou kunnen compliceren.

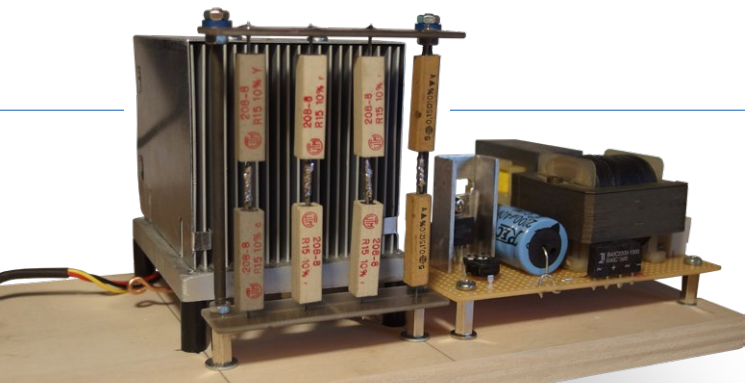
Specificaties

Mijn apparaat moet een belastingstroom tot 10 A aankunnen bij minimaal 12 V. Met een vermogensdissipatie van 120 W is het koellichaam extreem belangrijk; zonder ventilator zou dat al snel lomp groot worden. In de PC-technologie waren en zijn er processoren die de dissipatie van veel warmte vereisen; en ik had nog zo'n koellichaam/ventilator-combinatie uit de Pentium-tijd liggen. Met een groot koeloppervlak en een redelijk stille werking smeekte die om verdere experimenten. Dus als u erover denkt om een soortgelijk apparaat te bouwen, is het misschien handig om in uw 'misschien-nog-buikbaar'-doos te kijken voor geschikte onderdelen, want niet alles hoeft nieuw gekocht te worden!

In **figuur 1** ziet u mijn koellichaam, met daarop vier FET's van het type IRF740 gemonteerd, samen met gateweerstand, een NTC en een beveiligingsdiode. De gebruikte halfgeleiders lagen allemaal nog in mijn 'rommeldoos'; waarschijnlijk zijn veel vergelijkbare N-kanaal MOSFET's ook bruikbaar.

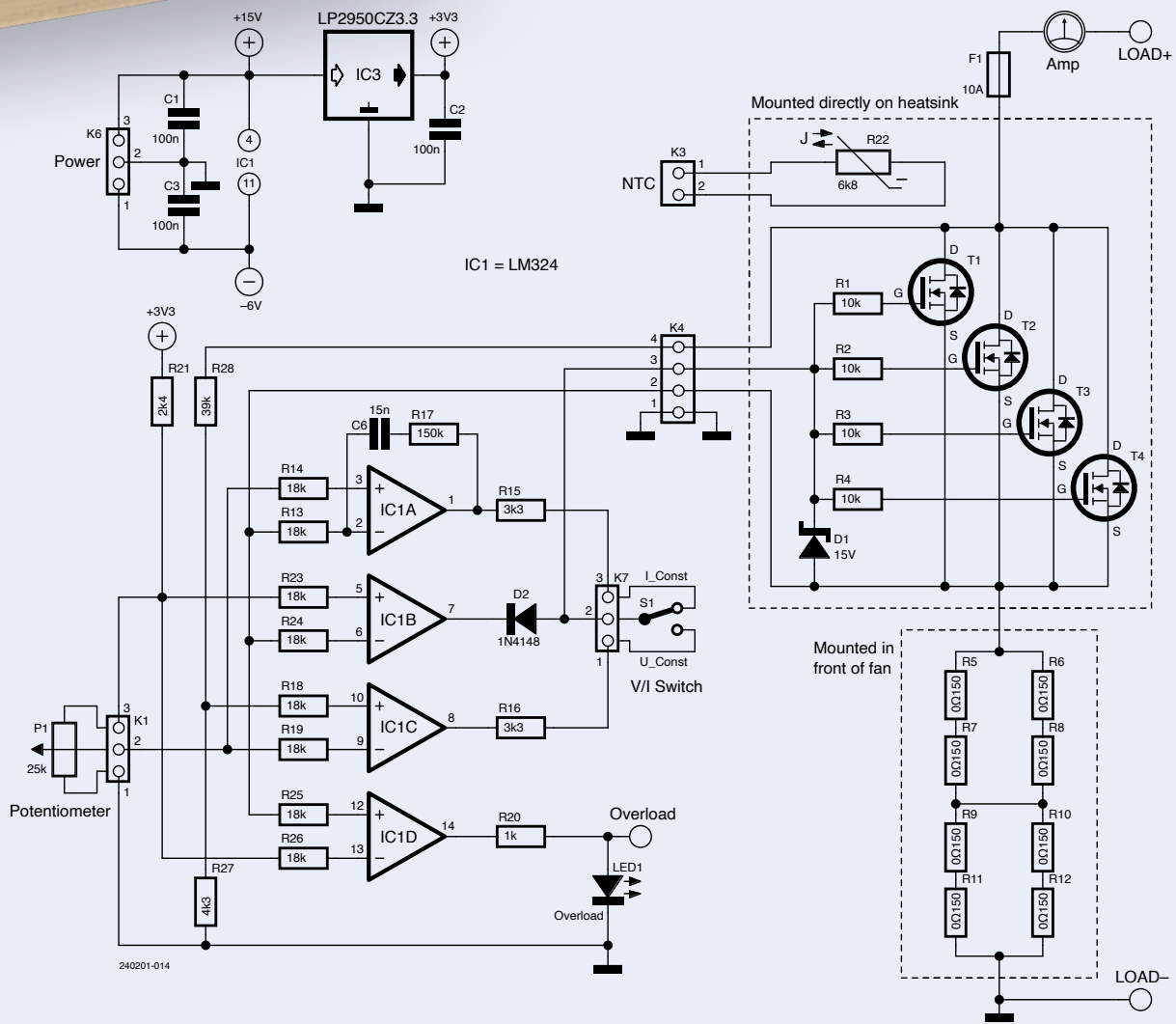


Figuur 1. De massieve bodemplaat van het koellichaam heeft M3-gaten met schroefdraad voor het monteren van de FET's en een NTC enzovoort.



Figuur 2. In totaal acht weerstanden met een waarde van $0,15 \Omega$ zijn zo aangesloten dat de totale weerstand $0,3 \Omega$ bedraagt. Geïnstalleerd in de luchtstroom blijft hun temperatuurstijging binnen aanvaardbare grenzen.

Figuur 3. Het 'hart' van de elektronische belastingweerstand, met de opamps, de FET's en de vermogensweerstanden.



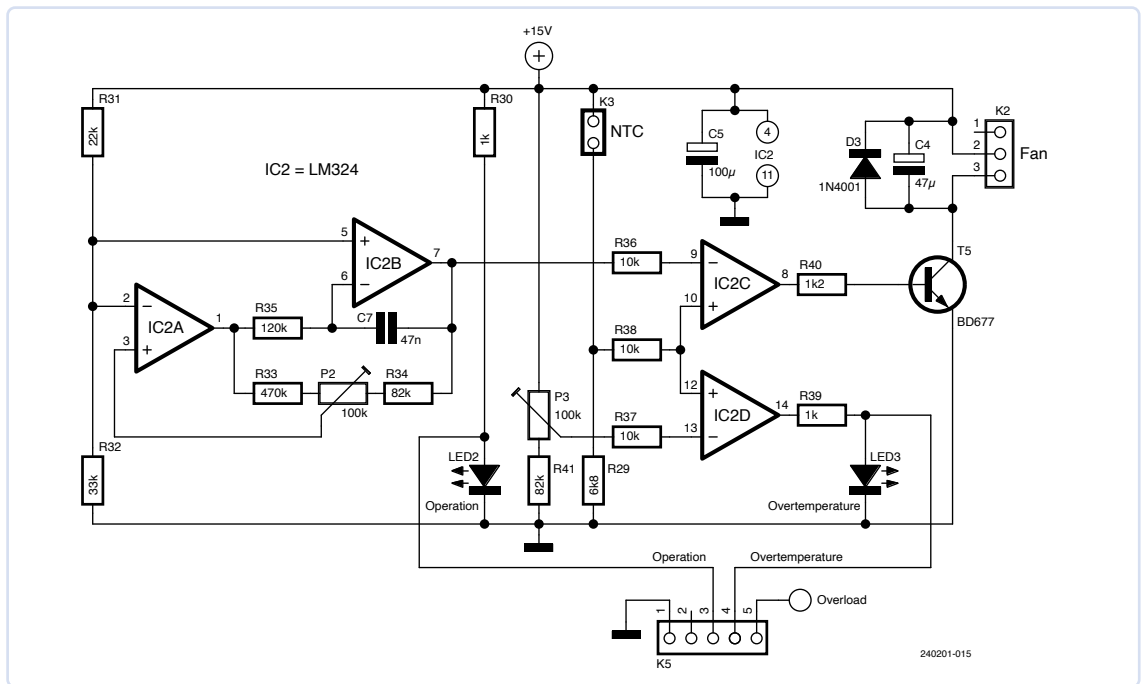
Met de forse stromen in kwestie is het geen gek idee om al vroeg na te denken over verstandig gedimensioneerde aansluitingen. De weerstanden voor het meten van de belastingstroom verdienen ook aandacht wat betreft hun 'dissipatievermogen'. Tussen al mijn onderdelen vond ik acht exemplaren van $0,15 \Omega/5 W$, die ik zo heb aangesloten dat een totale weerstand van $0,3 \Omega$ ontstond (figuur 2). De weerstanden kunnen tot 30 W dissiperen en door ze in de luchtstroom van de ventilator te plaatsen wordt oververhitting voorkomen.

Regelschakeling

De regelektronica is gebaseerd op een quad-opamp LM324 voor stroom- of spanningsregeling, zoals geschetst in figuur 3. De positieve voedingsspanning op K6 wordt eerst gebruikt om de referentiespanning te verkrijgen met een vaste spanningsregelaar van 3,3 V; die wordt via

weerstand R21 aangelegd op potmeter P1. De waarde van weerstand R21 ($2,4 k\Omega$) is zo gekozen dat samen met de potentiometer van $25 k\Omega$ een spanning van $0 \dots 3 V$ van de looper kan worden afgenomen. Elke andere potentiometer tussen $1 k\Omega$ en $50 k\Omega$ is ook bruikbaar als R21 overeenkomstig wordt aangepast. Een precisie-shuntregelaar zoals de TL431 met passende omringende schakeling zou een betere keuze zijn geweest om de referentiespanning van 3 V direct te genereren, maar helaas had ik die niet liggen.

De looper van potentiometer P1 is verbonden met de niet-inverterende ingang van IC1A, de eerste opamp van de LM324. De inverterende ingang wordt verbonden met de stroomvoerende weerstanden en de uitgang met de gates van de FET's via schakelaar S1 in de stand *I_Const*. Deze opamp zal proberen de belastingstroom zo aan te passen dat de spanningsval over de meetweerstand overeenkomt met de spanning



Figuur 4. Deze schakeling regelt de ventilatorsnelheid op basis van de temperatuur.

die is ingesteld met P1, zodat de belastingstroom constant blijft. Het RC-element C6/R17 werd proefondervindelijk bepaald om oscillatienegingen te voorkomen. Dit probleem was alleen in deze modus met de oscilloscoop te herkennen en kon eenvoudig worden geëlimineerd. De loperspanning van de potentiometer wordt ook aangelegd op de inverterende ingang van opamp IC1C. De niet-inverterende ingang van deze op-amp is via spanningsdeler R27/R28 verbonden met de ingangsspanning op de belasting (LOAD+). Als de uitgang van de opamp via de schakelaar in de stand *U_Const* (constante spanning) is verbonden met de FET's, zal deze proberen te voorkomen dat de spanning over de elektronische belasting boven de ingestelde waarde komt. De dimensionering van R27 en R28 staat een maximale spanning van ongeveer 30 V toe. Omdat er te grote stromen kunnen optreden met de schakelaar in de stand *U_Const*, beperkt opamp IC1B de maximale stroom. In zo'n geval

trekt diode D2 de gatespanning omlaag naar massa zodat de beoogde maximale stroom van 10 A niet wordt overschreden. Om het kwartet in de LM324 compleet te maken, regelt de vierde opamp (IC1D) de overbelastingsindicator LED1 in het geval van een te grote stroom. Om de belastingstroom te allen tijde in de gaten te houden, is (buiten de regelkring) een 10 A draaispoelmeter opgenomen in de verbinding met de belasting. Zoals u in de kopfoto kunt zien, heb ik in mijn apparaat een ampèremeter met een iets ander meetbereik gebruikt (omdat ik die nu eenmaal had liggen), die ik heb aangepast met een corresponderende spanningsdeler.

Ventilatorregeling

Het tweede deel van de schakeling rond IC2 (figuur 4), ook een quad-opamp LM324, regelt de ventilator, die alleen mag starten als dat nodig is; daarna moet de snelheid toenemen naarmate de temperatuur



Onderdelenlijst regelschakeling

Weerstanden:

(alle 1/4 W, tenzij anders aangegeven)

- R1...R4,R36...R38 = 10 k
- R5...R12 = 0Ω150 / 5 W
- R13,R14,R18,R19,R23...R26 = 18 k
- R15,R16 = 3k3
- R17 = 150 k
- R20,R30,R39 = 1 k
- R21 = 2k4
- R22 = NTC 6k8 met schroefbevestiging
- R27 = 4k3
- R28 = 39 k
- R29 = 6k8
- R31 = 22 k
- R32 = 33 k
- R33 = 470 k
- R34,R41 = 82 k
- R35 = 120 k

- R40 = 1k2
- P1 = potmeter 25 k
- P2 = instelpotmeter 100 k
- P3 = instelpotmeter 100 k
- Shuntweerstand voor draaispoelmeter, afhankelijk van type

Condensatoren:

- C1...C3 = 100 n
- C4 = 47 μ/25 V
- C5 = 100 μ/25 V
- C6 = 15 n
- C7 = 47 n

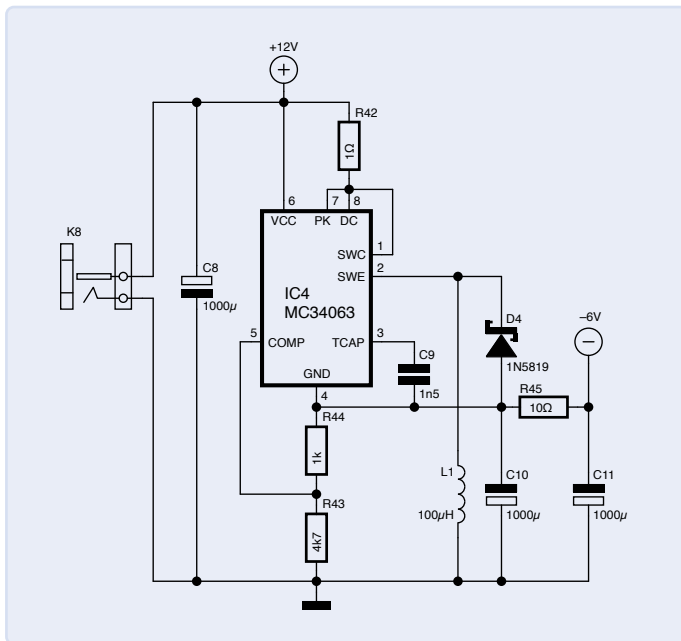
Halfgeleiders:

- D1 = zenerdiode 15 V
- D2 = 1N4148

- D3 = 1N4001
- LED1 = LED, 5 mm, geel
- LED2 = LED, 5 mm, groen
- LED3 = LED, 5 mm, rood
- T1...T4 = IRF740
- T5 = BD677
- IC1,IC2 = LM324
- IC3 = LP2950-CZ3,3

Diversen:

- S1 = tuimelschakelaar enkelpolig
- F1 = zekering 10 A met houder voor paneelmontage
- K1,K2,K6,K7 = eenrijige driepolige pinheader met stekker
- K3 = eenrijige tweepolige pinheader met stekker
- K4 = eenrijige vierpolige pinheader met stekker
- K5 = eenrijige vijfpolige pinheader met stekker

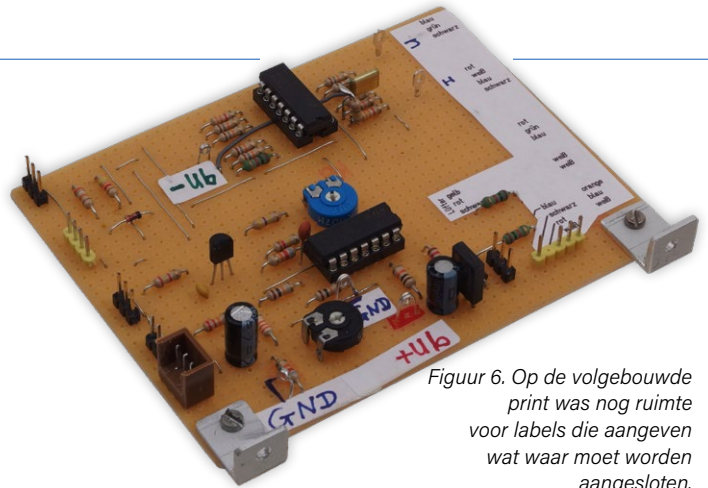


Figuur 5. Uit de enkele positieve uitgangsspanning van een netadapter genereert de omvormer een negatieve voedingsspanning (applicatie van de fabrikant).

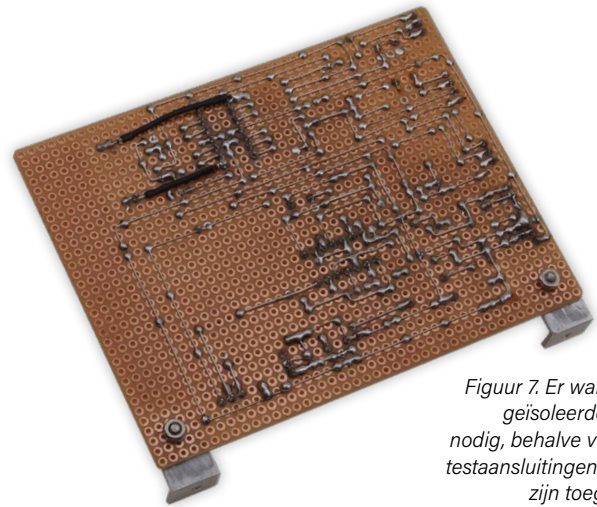
stijgt. Dit helpt om storende bijgeluiden zoveel mogelijk te vermijden. De opamps IC2A en IC2B vormen een driehoekgenerator die oscilleert rond een spanning die is ingesteld met R31 en R32. Deze spanning is zo gekozen dat bij kamertemperatuur de negatieve pieken van het signaal boven de waarde bij de spanningsdeler NTC en R29 liggen. IC2C vergelijkt de spanning bij de NTC met het driehoekssignaal en schakelt T5 in wanneer de temperatuur stijgt (dat wil zeggen wanneer de spanning op het knooppunt NTC/R29 toeneemt). Dit resulteert in een puls/pauze-verhouding (duty cycle) van 0...100%. De amplitude van het signaal kan worden beïnvloed met de instelpotentiometer P2. Hiermee verandert u de twee temperatuurwaarden die de PWM-eindpunten definiëren. Omdat de gebruikelijke ventilatoren niet starten bij een zeer kleine duty cycle, verlengt elco C4 zulke korte pulsen. De waarschuwingfunctie voor te hoge temperatuur wordt gerealiseerd met instelpotentiometer P3 en IC2D. U kunt binnen ruime grenzen instellen bij welke temperatuur LED3 gaat oplichten. Dit zou alleen het geval moeten zijn als zelfs de met maximaal toerental draaiende ventilator niet in staat is om het teveel aan warmte af te voeren (dus als de temperatuur van het koellichaam blijft stijgen). De drie signalen voor overbelasting, oververhitting en ventilatorwerking (plus massa) gaan via connectoren naar de corresponderende LED's op het frontpaneel.

Negatieve spanning

Ik had nog een voeding liggen die gebruikt kon worden om de regel-elektronica en de ventilatorsturing te voeden. Deze leverde 12...15 V in de positieve tak en -6 V in de negatieve tak, wat goed uitkwam. Als deze niet beschikbaar was geweest, had ik een van de vele netadapters kunnen gebruiken die ik had liggen. Een exemplaar voor een oude router met een uitgangsspanning van +12 V, aangevuld met een kleine schakelende regelaar om de negatieve spanning te genereren, was misschien zelfs een betere keuze geweest, omdat een externe voedingsadapter veiliger is aangezien deze de netspanning buiten het apparaat houdt. De in de datasheet gegeven schakeling van **figuur 5** [2] toont het handjevol componenten rond de MC34063 schakelende regelaar van Texas Instruments, die een negatieve spanning van -6 V kan genereren. Of het RC-filter R45/C11 echt nodig is, heb ik niet in detail onderzocht. Het is misschien mogelijk om het zonder te doen als de uitgangsrimpel geen probleem is, of om R45 te vervangen door een



Figuur 6. Op de volgebouwde print was nog ruimte voor labels die aangeven wat waar moet worden aangesloten.



Figuur 7. Er waren geen geïsoleerde draden nodig, behalve voor twee testansluitingen die later zijn toegevoegd.

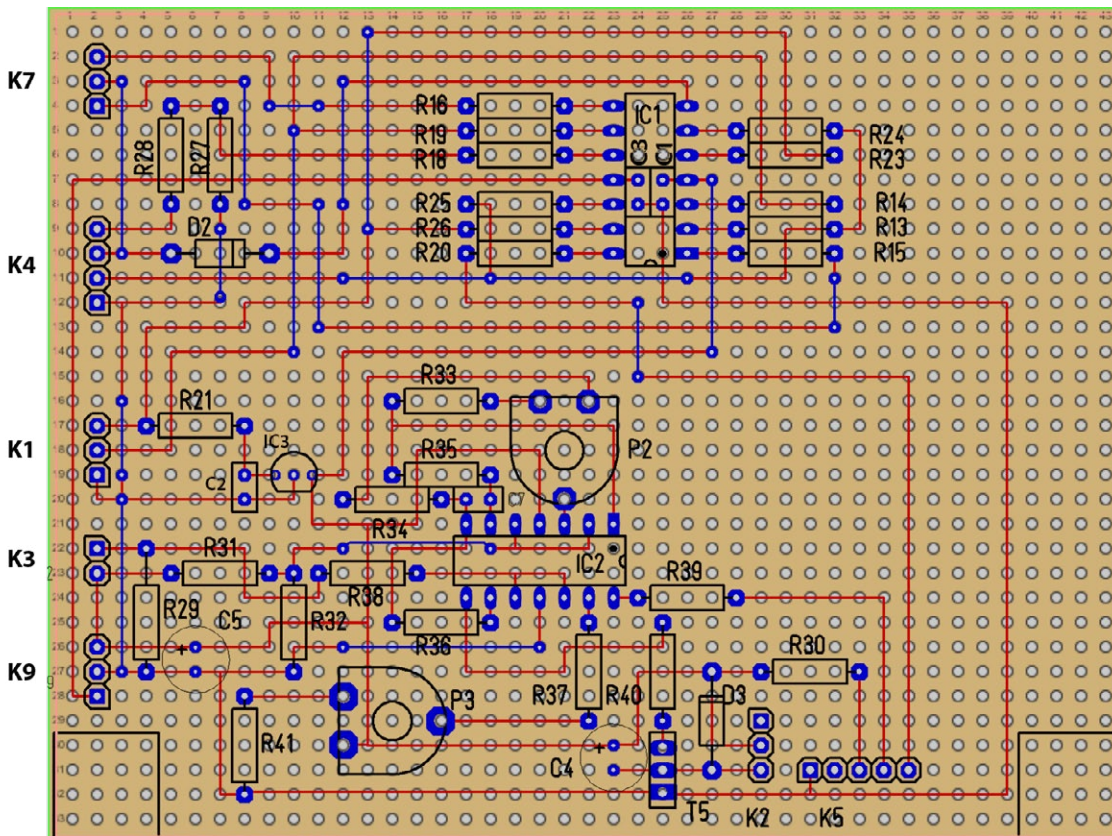
spoel van 1,0 µH, zodat de rimpel op de uitgangsspanning aanzienlijk wordt verminderd.

Bouw op gaatjesprint

Ondanks de vrij uitgebreide schakelingen wilde ik de elektronica graag op gaatjesprint bouwen en bedraden. Maar mijn eerste poging was uiteindelijk onbruikbaar, met in totaal 19 draadverbindingen die van de print naar extern gemonteerde componenten gingen – een bedradingsnachtmerrie!

Tenslotte heb ik mijn PCB-software TARGET 3001! zo geconfigureerd dat ik gemakkelijk en betrouwbaar het routeren op gaatjesprint kon simuleren. Het weergegeven raster is ingesteld op 2,54 mm, maar componenten kunnen ook buiten het raster worden geplaatst omdat hun referentiepunt (de kruishandgreep) niet altijd op een soldeer-punt ligt. In dit geval ondersteunt de software het proces niet rechtstreeks; u moet ervoor zorgen dat de soldeer-pads uitsluitend op de rasterpunten worden geplaatst. Als u de componenten dus correct plaatst en 'printsporen' alleen verticaal of horizontaal op boven- en onderzijde laat verlopen, is het resultaat een foutloos voorbeeld. Als de print op deze manier wordt ontworpen, is het veel eenvoudiger om een correcte en ruimtebesparende layout op gaatjesprint te maken. Bijna alle insteekconnectoren werden zelfs aan de zijkanten van de printplaat geplaatst, waardoor ze gemakkelijk bereikbaar zijn.

Figuur 6 toont de componentzijde, **figuur 7** de onderzijde en **figuur 8** de TARGET-componentenopstelling (inclusief gaatjespatroon), met de blauwe verbindingen aan de bovenkant en de rode verbindingen aan de onderkant van de print.



Figuur 8. Het resultaat van het routeren. Connectoren uit oude PC-behuizingen met hun vrolijk gekleurde kabels kunnen op de eenrijige headers worden geprikt. De zwarte vierkantjes onderaan geven gebieden aan die vrijgehouden moeten worden voor montagebeugels. De kleine condensatoren C1 en C3 zijn gemonteerd in de voet van IC1.

In en op de behuizing

U hebt waarschijnlijk gemerkt dat ik waar mogelijk gebruikte onderdelen uit mijn 'rommeldoos' probeer te hergebruiken. De draaispoelmeter die op de kopfoto te zien is, was oorspronkelijk bedoeld voor 100 μ A. Ik heb hem echter aangepast aan de combinatie van 0,3 Ω -weerstand van de stroomsensor, en wel zo dat de volle-schaal uitslag wordt bereikt bij 10 A. Een schakelaar naast het instrument maakt ook een weergavebereik tot 1 A mogelijk. Als ik deze meter niet al had liggen, had ik natuurlijk een geschikte draaispoelmeter voor 10 A gebruikt. Wanneer u de schakeling in de behuizing monteert, moet u ervoor zorgen dat de ventilator alleen lucht van buiten kan aanzuigen en dat de warme lucht de behuizing verlaat. Anders circuleert ten minste een deel van de luchtstroom in de kast, wat de koeling belemmert. Omdat warme lucht uitzet, moet de uitlaatopening groter zijn dan de inlaatopening.

Figuur 9 en figuur 10 tonen het resultaat van mijn inspanningen. Mijn behuizing is gemaakt van 4mm-triplex. De breedte van 13 cm en de

hoogte van 11,5 cm volgen uit de afmetingen van het koellichaam en de weerstanden die ervoor zijn gemonteerd. De voedingsprint die horizontaal in het achterste deel van de kast is gemonteerd, zorgde voor een diepte van 26 cm. Omdat een fatsoenlijke afwerking veel tijd kan kosten, heb ik (zoals ik al eerder heb gedaan [3]) een transparante folie op de zichtbare delen van de kast aangebracht, zoals die bij modelvliegtuigen wordt gebruikt om de vleugels te bekleden. Deze folie is bedekt met een smeltlijm en die bij verhitting strak trekt. Deze is op het gladgeschuurde maar verder onbehandelde hout aangebracht, waardoor een fraai uiterlijk ontstaat.



Figuur 9. De ronde opening komt overeen met de diameter van de ventilator-inlaat. De spijlen zorgen ervoor dat bijna alle aangezogen lucht van buiten komt.



Onderdelenlijst spanningsomvormer

Weerstanden:

R42 = 1 Ω
R43 = 4k7
R44 = 1 k
R45 = 10 Ω

Spoel:

L1 = 100 μ H

Halfgeleiders:

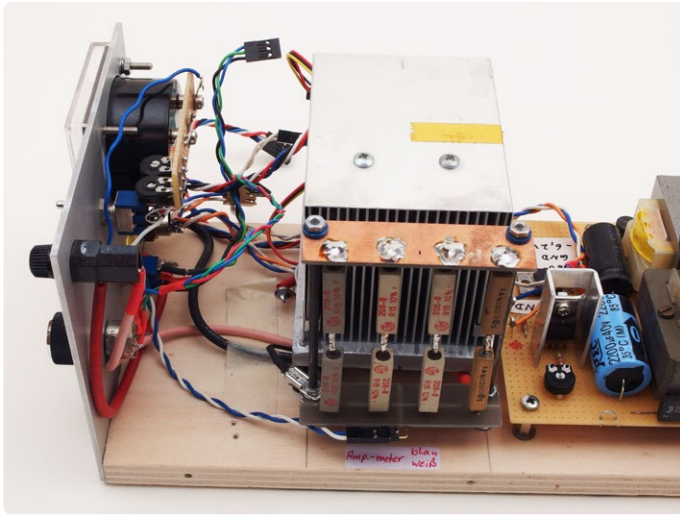
D4 = 1N5819
IC4 = MC34063

Condensatoren:

C8 = 1000 μ /25 V
C9 = 1n5
C10, C11 = 1000 μ /16 V

Diversen:

K8 = coaxiale voedingsconnector
Netadapter 12 V met minimaal 0,5 A uitgangsstroom



Figuur 10. De basisplaat is van 12mm-multiplex, waardoor ook schroeven in de kopse kanten mogelijk zijn. De serieweerstanden en trimmers van de ampèremeter zijn direct aan het instrument gesoldeerd om de bedrading te vereenvoudigen. De vermogensweerstand zijn gemonteerd met epoxyhars, M3-draadeinden en isolerende afstandsbusen.

Geen kritiek!

Om kritische opmerkingen bij voorbaat te voorkomen: met deze elektronische belasting wil ik beslist niet concurreren met fabrikanten van professionele meetapparatuur. Ik heb me niet om nauwkeurigheid of temperatuurgevoeligheid enzovoort bekommerd. Mijn meetinstrument met bereikschakeling is zo nauwkeurig mogelijk gekalibreerd met een multimeter. Maar als bijvoorbeeld de waarden van de vermogensweerstand of de referentiespanning een significante temperatuurafhankelijkheid vertonen, dan wordt dit niet gecompenseerd en leidt dit tot fouten. Het zij zo – ik kan daarmee leven!

Dit apparaat is vele malen beter dan alles wat ik eerder voor dergelijke doeleinden heb gebruikt. Bovendien vond ik het leuk om te bouwen en is het resultaat een apparaat dat prima geschikt is voor mijn behoeften, en dat voor een relatief lage prijs. Qua ecologische voetafdruk is mijn bouwsel ook niet slecht: heel wat onderdelen hebben hier een tweede leven gekregen. Al met al kan deze schakeling op zijn minst als suggestie dienen, hoewel het misschien niet geschikt voor gebruik in een professioneel laboratorium. ◀

240201-03



Over de auteur

Peter Grundmann (geboren in 1956) was al op jonge leeftijd geïnteresseerd in elektrotechniek. Later voltooide hij een commerciële leertijd, maar de laatste 25 jaar voor zijn pensioen werkte hij in de softwareontwikkeling. Hij is altijd trouw gebleven aan elektronica als hobby – waaronder analoge en digitale schakelingen en microcontrollerprojecten. Hij heeft nu een schat aan ervaring op gebieden zoals het maken van lichteffecten en het gebruik van servo's in modelspoorbanen. U kunt per e-mail contact met hem opnemen via peter@groupiemebtron.de.

Vragen of opmerkingen?

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



Gerelateerd product

> Joy-IT HD35 USB Load Resistor (35 W)
www.elektor.nl/19164

WEBLINKS

- [1] "Power MOSFET is core of regulated-dc electronic load," EDN.com, maart 2005: <https://t1p.de/pt534>
- [2] MC34063A-datasheet (Texas Instruments): <https://t1p.de/votu9>
- [3] Peter Grundmann, "Milliohm-Meter," Elektor Labs: <https://www.elektormagazine.com/labs/milliohm-meter>

STILL 24 REASONS TO CONNECT WITH US

USB TYPE-C™

GND TX1+ TX1- +V CC1 D+ D- SBU1 +V RX2- RX2+ GND



GND RX1+ RX1- +V SBU2 D- D+ CC2 +V TX2- TX2+ GND

© ei(Can/6)505



**WURTH
ELEKTRONIK**
MORE THAN
YOU EXPECT



Learn more about
the new Power Only
Connector!

USB-C Becomes Mandatory Charging Standard in the EU

Starting December 28, 2024, all mobile phones, tablets, and cameras sold in the EU must have a USB-C charging port. We offer a complete range of products for EMC interference, ESD protection, and power supply.

Ready for Design-In? Our technical sales team is here to support you. Samples are available for free. www.we-online.com/still24

Highlights

- USB-licensed Type-CTM connector WR-COM
- 60 W and 100 W Vbus filter
- Compact power inductors WE-MAPI & WE-MXGI
- Low parasitic ESD protection with WE-TVS



#USBTYPEC

2025 een AI-odyssee

enkele projecten voor het nieuwe jaar

Brian Tristam Williams (Elektor)

Het is januari 2025 en ik kijk ernaar uit om in een nieuw jaar op de hoogte te blijven van ontwikkelingen in de (plotseling) waanzinnig snelle wereld van kunstmatige intelligentie. In december heb ik geprobeerd AI te gebruiken om me te helpen met een paar leuke projecten. Zullen die nuttig zijn? Misschien wel, misschien niet – maar het ging me er vooral om aan het eind van het jaar plezier te hebben.



Source: Adobe Stock

Op het moment dat ik dit schrijf, moet december 2024 nog komen en denk ik na over waar ik een deel van mijn vrije tijd in december aan zal besteden, dus ik zou graag uw suggesties en ideeën voor een vervolg ontvangen. U vindt mijn contactgegevens in het kader **Over de auteur** aan het einde van dit artikel!

Er zijn minstens vier dingen die ik op mijn eigen manier wil bereiken, deels voor de lol, deels voor praktisch gebruik in de echte wereld, en misschien zijn een paar dingen beide.

Metagegevens video-archief

Ik sla al een paar decennia op deze trom, zoals ik al in eerdere afleveringen van deze column heb geschreven. Maar elke keer als ik er weer mee aan de slag ga, wordt het veel haalbaarder om bruikbare informatie te halen uit archiefvideo met een lage resolutie (lees: PAL- of NTSC-video met standaardresolutie, meestal van videocassette).

Een korte samenvatting van het 'waarom': Ik heb meer dan duizend uur video, voornamelijk opgenomen van televisie eind jaren '80 en in de jaren '90, en veel van de inhoud is nergens online beschikbaar. Veel daarvan

betreft nieuwsberichten, maar zelfs tv-reclames uit die tijd zijn waardevolle historische overblijfselen, vooral voor degenen die er toevallig bij betrokken waren.

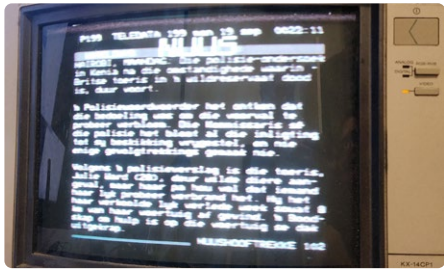
Stel dat uw kind bijvoorbeeld 8 was en in een tv-reclame voor Tamagotchi meedeed, maar misschien hebt u nooit een opname gekregen, of misschien hebben de tijd en een paar verhuizingen hun tol geëist en is het verloren gegaan voor de geschiedenis. Of – uw grootmoeder werd geïnterviewd voor een nieuwsbericht over haar prijs bij 'Tuinen van het Jaar' in 1997, en nu is het 28 jaar later en alles wat u nog hebt is haar naam en de naam van de wedstrijd?

Misschien ligt er ergens in iemands kast een tape met die advertentie of dat nieuwsbericht te verstoffen, en zal dat nooit het daglicht zien. Niemand heeft de tijd om elke zelf opgenomen videoband die ze tegenkomen handmatig te annoteren. Mijn doel voor de laatste paar decennia is om computers mij te laten helpen met het zware werk, en mijn meest recente gesprek met GPT-4o was echt bemoedigend. In het begin van deze eeuw bestond OCR (optische tekenherkenning) al een paar jaar. Het werkte vrij goed op met hoge resolutie

gescande documenten, maar ik probeerde het met frame grabs van video, en het was vrij nutteloos, zelfs bij tekst die zo groot was dat het misschien een achtste van de schermhoogte vulde. Ik heb het vrij recent nog eens geprobeerd en het was nog steeds teleurstellend.

Spraakherkenning heeft ook een lange weg afgelegd, van Milton Bradley die het MBX Expansion-systeem [1] voor de Texas Instruments TI-99/4A computer aanbood, compleet met een headset – zodat het kon detecteren of je één van de twee woorden 'ja' of 'nee' zei – tot Dragon Dictate in de jaren '90. Dat was duur, maar goed te doen als u CEO was en niet wist hoe u moest typen, tot de automatische onderschrijftengeneratoren van vandaag die hun werk weliswaar goed doen, maar geen rekening houden met de context, wat resulteert in een vervelende ontkoppeling tussen wat er gezegd werd en wat het computerbrein hoorde.

Objectdetectie is van recentere datum en was zes jaar geleden al haalbaar voor beveiligingscamera's met single-board computers. Met de huidige AI-versnellers voor Raspberry Pi en



Figuur 1. Zuid-Afrikaanse Teletekst Nuus in de jaren '80.

dergelijke is het mogelijk om 30 frames per seconde te detecteren met vooraf getrainde modellen voor objecten zoals 'hond' of 'mens', wat voldoende is voor beveiliging, maar lang niet voldoende voor de oneindige variatie aan dingen die men ziet gebeuren in een bepaald videoframe.

ChatGPT komt (opnieuw) ten tonele

Elke nieuwe versie van de generatieve AI lijkt nieuwe verrassingen op te leveren. Ik heb een aantal afbeeldingen van verschillende kwaliteit geladen, waarbij ik op een gegeven moment zelfs slechte foto's van de CRT-videomonitor maakte en ze direct via mijn telefoon verstuurde, en ik was verbaasd hoe goed ChatGPT me kon vertellen wat er precies gebeurde in de afbeelding. Een van de beelden was wazig (omdat de video jittert terwijl de telefoon een langzame foto maakt),

en van een slechte Betamax-tape van een Teletekstuitzending (figuur 1), en de 'bot kon het grootste deel van de tekst beter ontcijferen dan ik (figuur 2). (Het deed deze vreemde gok: de stoffige oude KX-14CP1-monitor is gemaakt door Sony, en de AI dacht dat het een Panasonic was, ondanks dat Panasonic nooit zo'n model heeft geproduceerd).

Toen probeerde ik een foto van een band die omstreeks 1993 was opgenomen van een zwak TV-station met een ontoereikende antenne. In figuur 3 zal het u moeite kosten om te vertellen wie dat is. ChatGPT vond het net zo moeilijk, totdat ik aandrong met een 'raad eens', waarop het antwoord kwam:

"Als ik moet gokken op basis van het beperkte en sterk vervormde beeld, lijkt het een figuur uit een TV-uitzending uit het midden van de 20^e eeuw. Het pak en de houding doen denken aan iemand als Carl Sagan (uit Cosmos) of een soortgelijke moderator/wetenschapper die vaak op TV verscheen om lezingen of presentaties te geven."

Ja, het was inderdaad Carl Sagan in Cosmos. Kun u zich voorstellen dat u een grondige

beschrijving (of beste schatting) van elk frame van elke video in een soort SQL-database onder handbereik hebt, klaar om te doorzoeken? Ik kan dat.

Maar voor mij is het probleem nog lang niet opgelost. Ten eerste was dit duidelijk een handmatig proces, waarbij ik een frame nam en naar ChatGPT stuurde, maar dat is geen enorm obstakel – het is eenvoudig genoeg om toegang te krijgen tot een API van OpenAI om alles te automatiseren wat men handmatig doet. Er zijn echter twee directe problemen die bij me opkomen.

Het eerste probleem is de verwerkingssnelheid. Bij 25 beelden per seconde in PAL-video (50 verschillende beelden per seconde als we geen de-interlacing toepassen), hebben we het over 270.000 te analyseren beelden bij een tape van drie uur, of 90 miljoen beelden in een archief van 1000 uur. ChatGPT werkt zo snel als het werkt en er is niet veel dat we kunnen doen om het te versnellen. Misschien kan generatieve AI die lokaal draait het aan (als ik er een kan vinden die het net zo goed doet), maar u hebt waarschijnlijk een forse geldbuidel nodig om bruikbare prestaties op die schaal te krijgen. De snelheid wordt dus ook een kostenprobleem.

Het tweede probleem zijn ook de kosten: als u de OpenAI API gebruikt, brengt elke aanroep kosten met zich mee. Als u 90 miljoen frames wilt analyseren, gaat een klein land failliet. Om verder te gaan met audio, ik heb ook Whisper [2] geprobeerd voor spraaktranscriptie, en het werkte vrij goed als de audio alleen spraak was en relatief duidelijk. Maar zodra er muziek klonk, raakte het helemaal in de war en ging de transcriptie mis (figuur 4). Een beetje muziek in een promo zorgde ervoor dat de



Figuur 3. Op de een of andere manier is het gelukt om Carl Sagan te identificeren op deze schermfoto van een slechte opname.

This is another teletext page, labeled P199 on TELEDATA, likely from the late 1980s or early 1990s, based on the style and context. The title is "NUUS" (Afrikaans for "News"), and the content describes an incident involving the police.

Key observations:

- The text mentions a **police investigation** into a case involving the death of a British tourist in a neighborhood. The word "**polisie-ondersoek**" (police investigation) and related terms suggest a criminal or suspicious incident.
- Details involve actions taken by a **police spokesperson**, referencing a 20-year-old female named **Julie Hart** and possibly a suspect or related individual. There is mention of a **father** and what appears to be a **rescue or intervention attempt**.
- This text is written in Afrikaans, common in South Africa's teletext services, particularly during the SABC's broadcast dominance.

The teletext is being displayed on a **Panasonic KX-14CP1** monitor, a 14-inch CRT often used for professional purposes like video editing or teletext systems in that era.

Would you like me to fully translate and analyze the news text for more insight?

Figuur 2. ChatGPT's analyse van de nauwelijks leesbare tekst.

```

Coming up on Larry King Live, America's sweetheart,
Mary Tyler Moore, dressed as Larry King,
talking about the ups and downs of her career and her life,
plus Dolly Parton, a sassy new video,
a super new album.
It's all next.
Don't go away.
For more than 120 million viewers
in over 200 nations and territories,
no one covers the world like CNN International.
Hi, everyone.
Here's a look at world weather.
Notice the bright white clouds
that are found in northern Argentina.
And here's a look at what's going on in South Africa.
And here's a look at what's going on in South Africa.
And here's a look at what's going on in South Africa.
And here's a look at what's going on in South Africa.
And here's a look at what's going on in South Africa.
And here's a look at what's going on in South Africa.
And here's a look at what's going on in South Africa.
And here's a look at what's going on in South Africa.
And here's a look at what's going on in South Africa.
And here's a look at what's going on in South Africa.
And here's a look at what's going on in South Africa.
And here's a look at what's going on in South Africa.
And here's a look at what's going on in South Africa.

```

Figuur 4. Whisper AI raakt de draad kwijt omdat het ergens muziek heeft gehoord.

Al de weerman vier goede zinnen toestond, waarna, nou ja, u kunt wel raden dat hij dat niet zo zei.

Mijn 'aardige' uitdaging voor december is dus om bruikbare metadata te genereren met methodes die zo efficiënt en kosteneffectief zijn als de huidige technologie toelaat, of dat nu online is of aan de edge (dat wil zeggen, uitgevoerd op lokale hardware). Natuurlijk zouden tips van buitenaf geweldig zijn. Neem contact met me op via de contactgegevens aan het einde van dit artikel.

Tekstavonturen in 2025?

"In de jaren '80", zoals veel te vaak wordt gezegd, voelden tekstgebaseerde avonturengames aan als vroege AI: men communiceerde in het Engels met het computerspel en het antwoordde in het Engels. Het onderstaande idee heeft, denk ik, de potentie om een Elektor-onderneming te worden... maar voordat ik daar aan toekom, laten we bij het begin beginnen voor degenen onder u die te jong zijn om te weten wat een tekstgebaseerd adventure game is.

Voordat computers hun intrede in de meeste huishoudens deden, werd er al geëxperimenteerd met het maken van interactieve avonturengames. Het idee was dat de speler zijn eigen verhaal kon regisseren door de hoofdpersoon van het spel te vertellen wat hij moest doen, en het resultaat zou daarop voortborduren. Hebt u een boek uit die boekenkast getrokken? Dan opende zich een geheime doorgang. Hebt u dat glas kapotgetrapt zonder uw veiligheidsschoenen? Sorry, maar dan bent u doodgebloed.

De uitdaging was dat computers in de jaren '70 en begin jaren '80 te weinig verwerkingskracht en grafische mogelijkheden hadden, om nog maar te zwijgen van de geheugenruimte die nodig was om het soort afbeeldingen op

te slaan dat je nodig had om een verhaal met afbeeldingen te kunnen vertellen. Dus in plaats van interactieve films kregen we interactieve boeken, dat wil zeggen, alleen tekst. Heeft het gebrek aan plaatjes me er ooit van weerhouden om van een goed boek te genieten? Nou ja, als kind gaf ik de voorkeur aan strips, maar dat bedoel ik niet.

Zelfs zonder afbeeldingen waren de systemen van weleer beperkt in de hoeveelheid tekst die ze konden verwerken, dus deden ze hun best om een soort 'AI' te simuleren terwijl ze een zeer beperkte woordenschat begrepen – ongeveer 120 woorden in het geval van het *Pirate Adventure*-spel van Scott Adams [3]. In die Adventure-games bestonden uw instructies aan de computer uit maximaal twee woorden, zoals TAKE BOOK (figuur 5). Zelfs met dergelijke beperkingen kon u hier uren of zelfs dagen of weken plezier aan beleven (het was mogelijk om de spelstand op te slaan op een cassettebandje of diskette).

Dus, afgezien van het feit dat dit vroege demonstraties zijn van voorgespiegelde AI gebaseerd op een veredelde hooiberg van IF-THEN-ELSE logica, waarom denk ik hierover na in 2025? Het is iets dat al in mijn achterhoofd zit sinds ik in 1998 SMS op mijn telefoon kreeg; een alleen-tekst-interface beperkt tot 160 tekens per bericht (de naam zegt het al: Short Message Service). Later werd Twitter uitgevonden, en de 140-karakter-limiet was geïnspireerd door SMS. Ja, er was een tijd in 2008 dat ik tweets verstuurde en ontving via SMS!

Nu, in 2025, kan X (voorheen Twitter) natuurlijk live video, afbeeldingen, spraaknotities en dergelijke doen en het heeft ook belangrijke concurrenten in de vorm van Threads, BlueSky enzovoort, maar het feit dat al hun DNA afkomstig is van een tekst-eerst, threaded reply-gebaseerde voorvader maakt ze zeer

```

I'm in a alcove. Visible items are:
Open window, Bookcase with secret
passage beyond
Obvious exit: DOWN
I'm carrying: Large blood soaked book
<-----
WHAT SHALL I DO?
WHAT SHALL I DO? TAKE BOOK
There's a strange sound.
WHAT SHALL I DO? GO STAIRS
* Welcome to Adventure number 2!
"Pirate Adventure" by Alexis & Scott
Adams, dedicated to Ted Heeren & Paul
Sharland. Remember, you can always ask
for "HELP".

```

Figuur 5. Screenshot van *Pirate Adventure* op de Texas Instruments TI-99/4A laat zien wat er gebeurt als u TAKE BOOK intypt.

geschikt voor tekstgebaseerde interactie. We kennen die boomvormige 'help'-systemen voor klanten van WhatsApp, USSD en SMS, waar u antwoordt met eenvoudige commando's of gewoon een nummer selecteert in een menu. Maar wat dacht u ervan om, in plaats van daarmee gepest te worden, er wat plezier aan te beleven in de vorm van een interactief tekstavontuur. Het avontuur zou kunnen worden gethematiseerd aan de hand van elk onderwerp dat we maar willen, dus het zou zich zelfs bij ons bij Elektor kunnen afspelen. We zouden bijvoorbeeld online een spel kunnen hosten waarin followers zoals u het tegen elkaar opnemen om een elektronica-gerelateerd avontuur op te lossen en de 'Engineer Extraordinaire'-prijs te winnen als u de oplossing als eerste vindt! Ik stel me voor dat het spel begint als een volger onze profielpagina bezoekt en een bericht naar ons stuurt:

START GAME

Die gegevens gaan dan naar het sociale media-platform, worden op het backend opgepikt door onze eigen code die ergens anders op een server draait en interageert via de API. Het zou dan de responslogica verwerken, de status van de spelsessie bijwerken en dan bijvoorbeeld dienovereenkomstig reageren op de gebruiker:

```

You are standing in the lobby at
Elektor. At the end of the hallway
is a door. The sign on it says "LAB."
It is slightly ajar and the lights
inside are flickering. Obvious exits
are EAST, WEST.

```

Dan antwoordt de speler en wordt de bal heen en weer gekaatst tot de speler verslagen of het spel gewonnen is.

Omdat standaardberichten en -reacties op deze platforms openbaar zijn, bent u niet beperkt tot één persoon die alleen thuis zit en een spel speelt dat niemand anders te zien krijgt, maar nu kan één hostaccount gelijk-

tijdige spellen draaien met veel spelers, die allemaal over de 'schouders' van anderen meekijken om tips en strategie te verzamelen, totdat uiteindelijk de laatste uitdaging valt en we een winnaar hebben.

Met dit soort ideeën ben ik blij dat een van de platforms BlueSky heet.

Ik ben enthousiast over deze game en ik wil me graag verdiepen in de server-side logica van hoe deze games worden geïnterpreteerd. ChatGPT heeft me wat goede ideeën gegeven op dat gebied, en ook ideeën over thema's en gameplay. Ik zal hier niet te veel in detail treden, maar het volstaat te zeggen dat weerstandskleuren altijd welkom zijn in een puzzel voor een elektronicus. We zullen zien in hoeverre ik dit idee de komende maand kan gaan realiseren.

MIDI-audiosynthese

Dit idee is slechts zijdelings AI-gerelateerd, maar daar komen we later op terug.

In 1994 kocht ik een Roland JV-30 keyboard [4] met ingebouwde muzieksynthesizer. Het kon niet alleen alle muziek afspelen die ik op het toetsenbord aansloeg, maar het stuurde ook elke toetsaanslag door via de 5-pins DIN MIDI (Musical Instrument Digital Interface) OUT-connector, zodat het andere synthesizers kon aansturen als u niet van het eigen geluid hield. Op dezelfde manier kon hij ook afspeelinstructies krijgen via zijn MIDI IN-connector, die ik vroeger gebruikte om de muziek van het DOOM-spel via de synthesizer af te spelen in plaats van via de geluidskaart van de PC, voor een betere kwaliteit. Later kreeg ik hem zover dat hij muziek afspeelde van een Arduino UNO die op MIDI IN was aangesloten (zie mijn video op [5]).

Maar een paar jaar geleden gebeurde er een ramp. Ik probeerde het schoolshirt van mijn kind te drogen door het over het keyboard te trekken en een haardroger te gebruiken. Toen ik de trui verwijderde, lachte het keyboard naar me alsof het een pleidooi hield voor betere tandheelkundige zorg – de helft van de toetsen was krom en vervangende toetsen kostten samen veel meer dan het keyboard waard was. (De synthesizer werkt nog steeds, dus ik heb het niet weggegooid).

Deze tragedie was de gelegenheid om het te vervangen en eindelijk meer dan 61 toetsen te hebben. Dus kocht ik een M-Audio Keystation 88 [6], met het volledige klavierbereik van 88 toetsen.



Figuur 6. Minecraft helpt kinderen logisch en systematisch te denken, wanneer dat nodig is (bron: Adobe Stock/@Wirestock).

De Keystation heeft echter geen synthesizer, wat betekent dat het alleen een toetsenbord is en dat je een ander apparaat nodig hebt, zoals een PC of mobiele telefoon om hoorbaar geluid te produceren. Ik wist dit, maar ik realiseerde me niet hoeveel gedoe dat zou zijn. Ik wil gewoon inschakelen en spelen, en niet op zoek moeten naar een extern apparaat dat niet speciaal voor die taak is bedoeld.

Eerst dacht ik aan een directe upgrade van de Keystation naar een ander keyboard/elektrische piano die geluiden kon maken, maar na wat praten met ChatGPT kocht ik uiteindelijk een standalone synthesizer, de Roland D-110 [7], die in 1988 werd uitgebracht. Ja, de jaren '80 in een doosje, zoals iemand hem noemde – hoor hoe hij klinkt op [8]! Ik kreeg hem voor een spotprijs, maar vlak nadat ik er online voor had betaald, kwam ChatGPT met een beter idee (bedankt?).

Het idee was niet eens zo origineel. Het was een van die 'waarom heb ik daar niet aan gedacht?'-momenten, vergezeld van een klap op het hoofd: gebruik een Raspberry Pi! Het aanvankelijke idee leek niet zo aantrekkelijk – ik dacht aan een GUI, steeds moeten opstarten, een specifieke toepassing openen, een monitor, toetsenbord en muis moeten aansluiten enzovoort. Dat is niet beter dan het gebruik van een PC, behalve dat de Raspberry Pi betaalbaar en klein genoeg is om exclusief hiervoor te gebruiken.

De bot stelde echter een headless installatie voor, wat mijn favoriete manier is om een Raspberry Pi te gebruiken. 'Headless' betekent dat je geen 'overhead' nodig hebt in de vorm van een monitor, toetsenbord en muis op uw server of embedded board. Alle noodzakelijke configuratie-interacties met het board vinden plaats via een terminalvenster op een andere computer, maar voor dagelijks gebruik kunt u zoiets simpels als een Raspberry Pi met dubbelzijdig plakband aan de achterkant van uw keyboard plakken, en voilà, uw keyboard-only muziekinstrument maakt nu geluid.

Nu de raakvlakken met AI. Er bestaat veel interesse voor AI-versnellers voor single-board computers, zowel extern, zoals de Raspberry Pi AI-versneller, als on-board, zoals in het geval van de BeagleY-AI [9] van BeagleBoard. Met deze kracht die nu aan de edge beschikbaar is, is het niet vergezocht om je voor te stellen dat AI 'luistert' naar wat je speelt (via MIDI-data) en niet alleen je noten synthetiseert, maar je ook begeleidt 'je eigen gratis back-up keyboardspeler, wat denkt u daarvan? Ik heb toevallig een BeagleY-AI, dus dat wordt mijn favoriete platform voor dit experiment in december.

Minecraft-automatisering

U hebt uw kinderen misschien urenlang Minecraft zien spelen (**figuur 6**), maar wat niet iedereen zich realiseert is dat het meer is dan alleen een spel – het is een krachtig platform voor creativiteit, probleemoplossing en zelfs engineering. Of het nu gaat om het automatiseren van enorme bouwwerken of het simuleren van logica uit de echte wereld met de 'Redstone'-schakelingen, Minecraft biedt een speelplaats waar codering, elektronica en ontwerp tot leven komen op een manier die zowel professionals als hobbyisten aanspreekt. Ik ben een beetje laat, want Minecraft is al sinds 2009 in de een of andere vorm beschikbaar – voordat mijn dochter in 2010 werd geboren. Ik voelde er niet veel voor om veel tijd te steken in 'spelletjes spelen', maar nu ze oud genoeg is om het te snappen (en me een paar trucs te leren), heb ik me verdiept in het technische onderwijsaspect ervan (en het handmatig maken van 'kunst' dat ook geautomatiseerd zou kunnen worden (zie **figuur 7**)). Ik weet dat mensen al jaren computers bouwen in Minecraft-werelden, van de grond af aan: met logische poorten. U kunt een geweldige introvideo bekijken op [10], maar u kunt u helemaal uitleven in dit onderwerp. In het echte leven, als u FPGA's (field-programmable gate arrays) programmeert, begint

Figuur 7.: Maar dat betekent niet dat u niet creatief kunt zijn – dit met de hand gemaakte Texas Instruments-logo had een script kunnen zijn dat GIF's converteert naar geautomatiseerde Minecraft-builds.



u ook met de eerste beginselen en kunt u bijna elk digitaal logisch circuit namaken. Ik heb geen ervaring op dit gebied, maar mijn collega-engineers hebben het geprobeerd, waaronder Jean-François Simon in zijn project "Een VHDL-klok gemaakt met ChatGPT" [11]. Omdat ik een liefhebber ben van retro-computing, ben ik benieuwd wat ik kan nabootsen in Minecraft, van eenvoudige 74x-serie digitale logica tot meer ambitieuze computerprojecten. Ja, de 'fysieke' schakelingen die u in Minecraft bouwt zijn enorm en log en draaien extreem langzaam, maar het is ontzettend gaaf om een microcontroller uit de jaren '80 of (zelfs) een microcomputer tot op poortniveau te kunnen emuleren – kijk maar eens hoe SethBling dat deed voor de Atari 2600 [12].

Het probleem is de complexiteit. Het zou me veel te veel tijd kosten om duizenden componenten handmatig te plaatsen. Het lijkt erop dat er manieren zijn om kopieën van grote structuren (zoals RAM) die gerepliceerd moeten worden te slepen en neer te zetten, maar uiteindelijk wil ik deze dingen kunnen scripten en automatiseren, net zoals ik heb gedaan toen ik Conway's Game of Life in Roblox [13] bouwde, met behulp van de programmeertaal Lua. Wie weet ga ik tegelijkertijd aan de slag met FPGA-programmering, waarvoor ik me ook tot de vertrouwde Elektor-engineers wend.

De resultaten: te ambitieus of overdreven optimistisch?

We zullen zien, maar ik kijk uit naar deze experimenten en ik zal u laten weten wat ik ervan geleerd heb. Nogmaals, als u ideeën, vragen, suggesties of opmerkingen hebt, of gewoon wilt vertellen over wat je in de jaren '80 hebt uitgespookt, kun je me bereiken via het e-mail-adres onder **Vragen of opmerkingen**. ◀

230181-K-03

Over de auteur

Brian Tristam Williams is al gefascineerd door computers en elektronica sinds hij op 10-jarige leeftijd zijn eerste 'microcomputer' kreeg. Zijn reis met Elektor Magazine begon toen hij op 16-jarige leeftijd zijn eerste nummer kocht en sindsdien volgt hij de wereld van elektronica en computers, onderzoekt en leert hij voortdurend. In 2010 begon hij voor Elektor te werken en tegenwoordig houdt hij zich graag op de hoogte van de nieuwste trends op het gebied van technologie, waarbij hij zich vooral richt op AI en single-board computers zoals de Raspberry Pi.

Vragen of opmerkingen?

We horen graag hoe u AI gebruikt en wat de invloed ervan is geweest in de afgelopen twee jaar. Als u vragen of opmerkingen hebt, stuur dan een e-mail naar brian.williams@elektor.com. U kunt me ook elke maand zien op Elektor Engineering Insights op YouTube, en u kunt me vinden @briantw op X.



Gerelateerde producten

- > **Angelo La Spina, Analogue Video (E-Book)**
www.elektor.nl/16889
- > **Pimoroni Piano HAT for Raspberry Pi**
www.elektor.nl/20552
- > **Raspberry Pi AI HAT+ (26 TOPS)**
www.elektor.nl/21038
- > **BeagleY-AI SBC with GPU, DSP and AI Accelerators**
www.elektor.nl/20991

WEBLINKS

- [1] MBX Uitbreidingssysteem voor de Texas Instruments Home Computer: <https://videogamehouse.net/mbx.html>
- [2] Introducing Whisper: <https://openai.com/index/whisper/>
- [3] Pirate Adventure: https://en.wikipedia.org/wiki/Pirate_Adventure
- [4] Vintage Synth Explorer: The Roland JV-30: <https://vintagesynth.com/roland/jv-30>
- [5] Arduino Playing a Roland JV-30 MIDI Keyboard/Synthesizer: <https://youtu.be/1M0ADumGuHw>
- [6] M-Audio Keystation 88 II: <https://m-audio.com/legacy/keystation-88.html>
- [7] Music Magazine — The Roland D-110: <https://muzines.co.uk/articles/roland-d110/2282>
- [8] Roland D-110 Synthesizer Module Patches and Tunes: <https://youtu.be/u3oQoMtZeTl>
- [9] BeagleY-AI: <https://beagleboard.org/boards/beagle-y-ai>
- [10] Computerarchitectuur uitgelegd met Minecraft: https://youtu.be/dV_lf1kyV9M
- [11] J.-F. Simon, "Een VHDL-klok gemaakt met ChatGPT", Elektor Guest-Edited AI Edition 2024: <https://elektormagazine.nl/240602-03>
- [12] 1 FPS Atari 2600 Emulator in Vanilla Minecraft 1.13: https://youtu.be/mq7T5_xH24M
- [13] Conway's Game of Life in Roblox: https://youtu.be/2q_v1aw4-kQ

Douk Audio P6 mini Buizen Voorversterker

Verhoog uw audio-ervaring met de Douk Audio P6 mini buizen voorversterker, een perfecte mix van moderne connectiviteit, HiFi-geluidskwaliteit en vintage charme. Of u nu een audiofiel bent of net begint aan uw reis naar audio van hoge kwaliteit, deze compacte maar krachtige voorversterker biedt alles wat u nodig hebt.



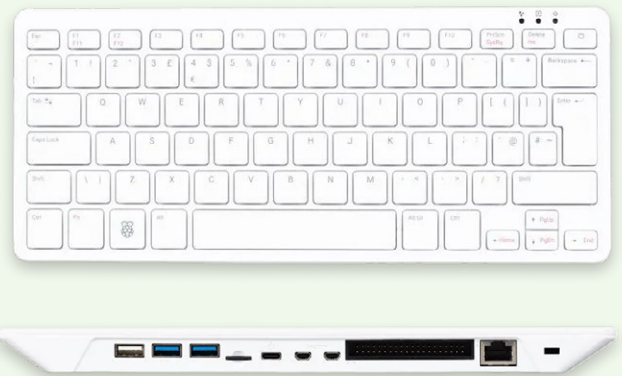
Prijs: € ~~74,95~~

Actieprijs: € 59,95

www.elektor.nl/21014

Raspberry Pi 500 (US)

De Raspberry Pi 500 (gebaseerd op de Raspberry Pi 5) heeft een quad-core 64-bit Arm-processor, RPI I/O-controller, 8 GB RAM, draadloze netwerken, dual-display uitgang, 4K video-weergave en een 40-pins GPIO-header. Het is een krachtige, compacte all-in-one computer ingebouwd in een draagbaar toetsenbord.



Prijs: € 104,95

www.elektor.nl/21074

FNIRSI GC-02 Nucleaire Stralingsdetector (Geigerteller)



Prijs: € 49,95

Ledenprijs: € 44,96

www.elektor.nl/21046

M5Stamp Fly Quadcopter (met M5StampS3)



Prijs: € 79,95

Ledenprijs: € 71,96

www.elektor.nl/21008



Project-update: Amp Volt v2.0

100 ampère en meer!

Saad Imtiaz (Elektor)

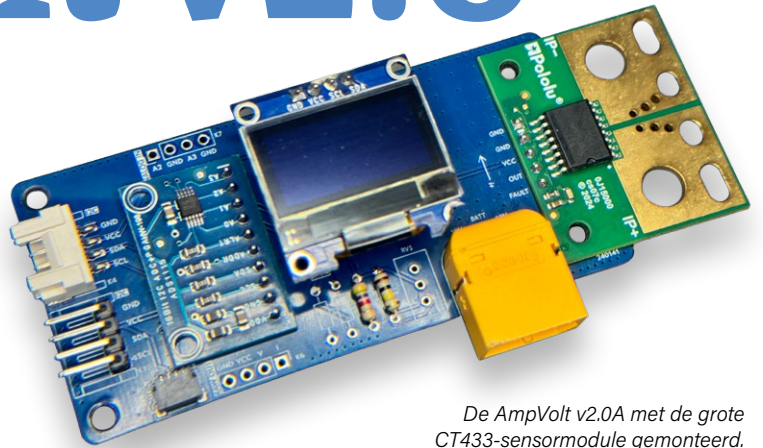
In het vorige artikel over dit project hebben we een modulaire print gepresenteerd die gelijkstroom en energieverbruik kon meten tot 50 V en 5 A. In dit artikel wordt een vernieuwde versie van het project beschreven die tot 60 V en 100 A (en zelfs meer) aan kan.

Voordat we ons in de update verdiepen, zullen we het concept en de motivatie achter de ontwikkeling van het project nog even bekijken. Hoewel er meer USB-gebaseerde vermogens- en energie-meetmodules zijn, blijven oplossingen voor het meten van gelijkspanningen hoger dan 12 V, en vooral hoger dan 24 V, zeldzaam. Deze hogere spanningen worden echter steeds relevanter met de groeiende toepassing van krachtige accu's in PV-systemen, elektrische fietsen, laders voor elektrische voertuigen, elektrisch gereedschap, tuingereedschap en meer. Het AmpVolt-project speelde op deze ontwikkeling in door een efficiënte, betrouwbare en flexibele oplossing te bieden voor spannings- en stroommetingen bij hogere spanningen en stromen, met name voor dergelijke moderne toepassingen.

In de eerste versie lag de nadruk op eenvoud en bruikbaarheid. Het ontwerp was gericht op het integreren van kant-en-klare modules op een enkele print die nauwkeurige stroom- en spanningsbemonstering aankon met goede nauwkeurigheid door middel van een zeer nauwkeurige analoog/digitaal-converter (ADC). Door deze aanpak was de AmpVolt zowel veelzijdig als efficiënt.

Voor de eerste versie van AmpVolt [1] waren de meetmogelijkheden begrensd tot maximaal 50 V en 5 A, gebruik makend van de INA169-stroomsensor in combinatie met een spanningsdeler en een 12-bit ADS1015 ADC-module. Samen zorgden deze componenten voor betrouwbare en nauwkeurige stroom- en spanningsmetingen, bruikbaar in een breed scala toepassingen. Om de bruikbaarheid te maximaliseren communiceert de module via een standaard I²C-interface met 3,3V- of 5V-microcontrollers.

Om de bruikbaarheid en flexibiliteit te verbeteren bevatte de print een OLED-display dat ook via de I²C-bus werd aangestuurd, om real time-metingen rechtstreeks op het apparaat af te kunnen lezen. De print is voorzien van verschillende I²C-aansluitingen, zoals Grove- en



De AmpVolt v2.0A met de grote CT433-sensormodule gemonteerd.

Qwiic-connectoren, maar ook een JST XH-connector met 2,54mm-raster, waardoor naadloze integratie in vele systemen mogelijk is. Bovendien is gekozen voor XT60PW-connectoren voor het aansluiten van de belasting en de voedingsbron, waardoor compatibiliteit met veelgebruikte accusystemen wordt geboden. Het modulaire ontwerp maakt het verder mogelijk om een eigen versie te bouwen met goed verkrijgbare componenten. Die eerste versie heeft een solide basis gelegd en nu gaan we verder met de laatste updates om dit ontwerp te verbeteren. Het hoofddoel blijft consistent met het oorspronkelijke idee: een eenvoudige en betrouwbare manier bieden om hogere stromen en spanningen te meten. Zoals uit de inleiding van dit artikel waarschijnlijk al duidelijk werd is de belangrijkste update in deze versie de mogelijkheid om te meten tot 60 V en 200 A. Deze verbetering werd mede mogelijk gemaakt door gebruik te maken van Hall-effect stroomdetectie in plaats van de oorspronkelijke meting met een shuntweerstand.

Eigenschappen

- › Spanningsbereik: tot 60 V
- › Stroombereik: tot 200 A (afhankelijk van de variant)
- › Stroommeet-technologie: sensoren op basis van Hall-effect en TMR (Allegro Microsystems)
- › Sensorcompatibiliteit: Pololu compacte en grote carriermodules (zoals CT433, CT432, ACS72981 en meer)
- › Aansluitmogelijkheden: XT60-connectoren voor eenvoudige integratie
- › Datacommunicatie: I²C-interface compatibel met 3,3 V en 5 V microcontrollers
- › Directe soldeer pads voor compacte sensormodules (varianten B en C)

Vergelijking van Pololu stroomsensor-modules

Bron: [2]

Sensor-type	Sensor-technologie	Stroombereik	Gevoeligheid (mV/A)	Max. bandbreedte	IC stroomweerstand	Maten	Overstroomindicatie	Common Mode Field Rejection	Niet-ratio-metrische uitgang
CT432/ CT433	XtremeSense TMR (tunneling magnetoresistance)	± 20 A / ± 30 A / ± 50 A / ± 100 A / ± 200 A	20 / 10 / 5	1 MHz	1 m Ω	1,4" x 1,2"	x	x	x
CT432/ CT433	XtremeSense TMR (tunneling magnetoresistance)	± 20 A / ± 30 A / ± 50 A / ± 100 A / ± 200 A	20 / 10 / 5	1 MHz	1 m Ω	0,8" x 1,1"	x	x	x
ACS71240	Hall effect	± 10 A / ± 30 A / ± 50 A	132 / 44 / 26,4	120 kHz	0,6 m Ω	0,7" x 0,8"	x	x	x
ACS72981 Compact	Hall effect	± 50 A / ± 100 A / ± 150 A / ± 200 A	26,4 / 13,2 / 8,8 / 6,6	250 kHz	0,2 m Ω	0,7" x 0,8"		x	
ACS72981 Large	Hall effect	± 50 A / ± 100 A / ± 150 A / ± 200 A	26,4 / 13,2 / 8,8 / 6,6	250 kHz	0,2 m Ω	1,4" x 1,2"		x	
ACS37220 Compact	Hall effect	± 100 A / ± 150 A	13,2 / 8,8	150 kHz	0,1 m Ω	0,7" x 0,8"	x	x	x
ACS37220 Large	Hall effect	± 100 A / ± 150 A	13,2 / 8,9	151 kHz	0,1 m Ω	1,4" x 1,2"	x	x	x

Hall-effect versus shuntweerstand

Op het eerste gezicht zou u zich kunnen afvragen of deze verandering niet ten koste gaat van de nauwkeurigheid, maar moderne Hall-effect stroomsensoren zijn flink verbeterd. Ze bieden nu een indrukwekkende precisie, kleine footprint, hogere efficiëntie en eenvoudige integratie, waardoor ze een uitstekende keuze zijn voor het meten van grotere stromen.

Als we 200 A-metingen willen doen met een shuntweerstand komen we bij het ontwerpen voor verschillende uitdagingen te staan. Shunts voor zulke hoge stroomsterktes vereisen een zorgvuldige afweging met betrekking tot de vermogensdissipatie omdat ze bij dergelijke stromen flink wat vermogen in warmte omzetten. Het ontwerpen van een nauwkeurig meetcircuit met een lage ruis vraagt dan ook een zorgvuldig ontworpen print en warmte management. Een meetschakeling gebaseerd op een shunt heeft daarnaast meestal ook een versterker nodig om de kleine spanningsval nauwkeurig te kunnen meten, wat de schakeling weer complexer maakt.

Hall-effect sensoren daarentegen isoleren het meetcircuit inherent van het stroomcircuit, waardoor veel warmte- en veiligheidsproblemen worden geëlimineerd, terwijl de nauwkeurigheid behouden kan blijven en de complexiteit van het systeem beperkt blijft. Deze voordelen maken ze tot een ideale oplossing voor de verbeterde versie van het AmpVolt-project.

De weg naar AmpVolt v2.0

Ik heb meerdere e-mails van lezers ontvangen die suggereerden dat het project geschikt zou moeten zijn voor stromen van meer dan 20 A. Deze feedback motiveerde me om een tweede versie van het project te ontwikkelen. Na online onderzoek te hebben gedaan naar verschillende moderne sensormodules ontdekte ik de Pololu-sensoren [2][3]. Hun ontwerp, kwaliteit en specificaties vielen meteen op, wat me ertoe aanzette er een paar te bestellen om te testen. Bij aankomst overtroffen de sensoren zelfs mijn verwachtingen qua bouwkwiteit en qua prestaties, en sloten ze nauw aan bij de vermelde specificaties. (Disclaimer: hoewel ik ze niet met grotere stromen dan 30 A heb getest, vertrouw ik op de mogelijkheden in de documentatie.)

De Pololu-stroomsensormodules, gebouwd rond Allegro Microsystems-



Onderdelenlijst

Weerstanden:

R1 = 170 k
R2 = 10 k
R3,R4 = 22 k
RV1 = 170 k
(meerslagen-potmeter
potmeter indien nodig)

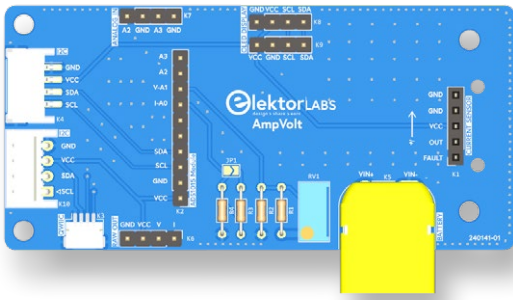
Modules en connectoren:

K1 = Pololu Current Sensor
K2 = ADS1015
K8,K9 = I2C OLED-display
K3 = Qwiic-connector
K4 = Grove-connector
K5,K11 = AMASS XT60PW-M
K7,K10 = eenrijige vierpolige pinheader
verticaal, raster 2,54 mm

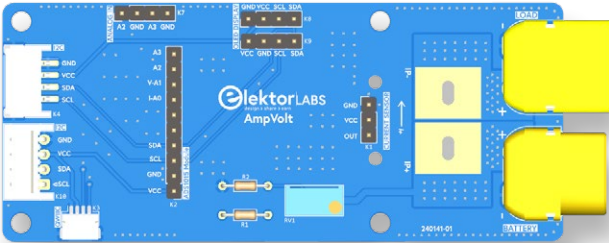
chips [4], zijn sensoren van industriële kwaliteit en ze staan bekend om hun hoge nauwkeurigheid, betrouwbaarheid en veiligheid. Een belangrijke factor bij de keuze voor deze sensormodules was hun compacte en consistente vormfactor. De grotere modules meten 35,56x30,48 mm [5] en de compacte varianten zijn 17,78x20,32 mm [6]; alleen de CT432/433-gebaseerde modules zijn iets groter met 20,32x27,94 mm [7].

De CT432/CT433- en ACS-serie sensoren van Allegro voldoen aan verschillende behoeften, elk met specifieke voordelen voor diverse toepassingen. De CT432/CT433-modules, op basis van TMR-technologie (Tunnel Magnetoresistance) [8], bieden een uiterst lage weerstand (0,2 m Ω) en een hoge bandbreedte tot 1 MHz, waardoor ze ideaal zijn voor high speed-, hogestroom-toepassingen zoals motorbesturing, lasapparatuur of dynamische vermogensbewaking. Hun superieure gevoeligheid, verminderde ruis en energie-efficiëntie maken ze ook geschikt voor precisie- en low power-ontwerpen. Daarentegen biedt de ACS-serie, gebaseerd op Hall-effect sensoren, een evenwicht tussen betaalbaarheid, ruisonderdrukking en integratieflexibiliteit. Compacte varianten zijn perfect voor IoT- en embedded systemen met beperkte ruimte, terwijl grote carriers uitblinken in toepassingen met hoge stroomsterkte, zoals het laden van elektrische voertuigen en accumanagement.

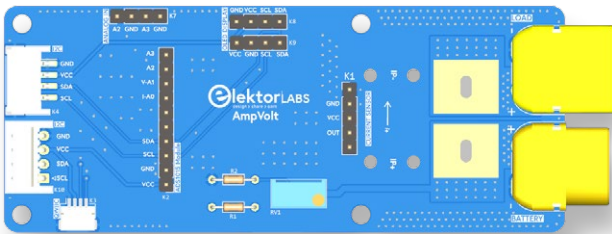
Om dit brede scala aan sensormogelijkheden te accommoderen,



Figuur 1. De AmpVolt v2.0A-variant – ontworpen voor zowel grote als compacte sensormodules.



Figuur 2. AmpVolt v2.0B-variant – geoptimaliseerd voor compacte sensormodules en met ondersteuning voor XT60-connectoren.

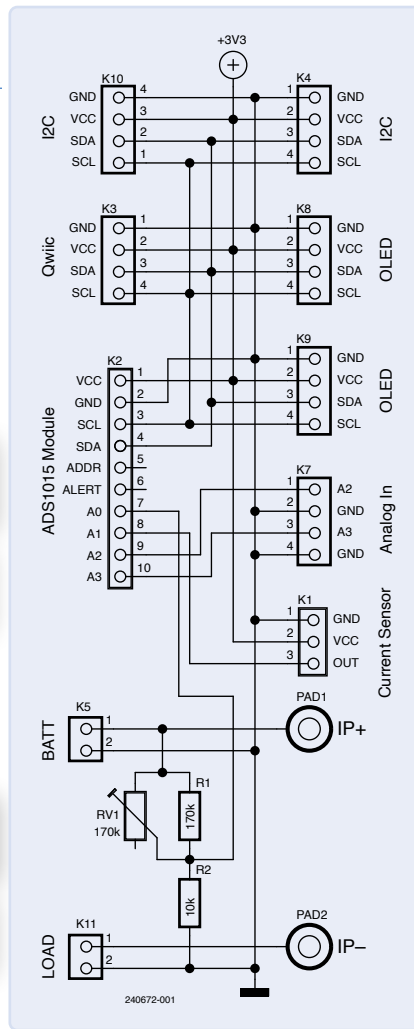


Figuur 3. AmpVolt v2.0C-variant – geconfigureerd voor compacte sensormodules op basis van de CT432/433.

hebben we drie varianten van de AmpVolt v2.0 ontworpen (A, B en C), die zowel de compacte als de grotere modules ondersteunen. Deze modulaire aanpak zorgt voor compatibiliteit in verschillende toepassingsscenario's, waardoor gebruikers de oplossing kunnen aanpassen aan hun specifieke vereisten.

- **AmpVolt v2.0A:** deze variant ondersteunt zowel grote als compacte modules, waardoor hij geschikt is voor toepassingen met grote stroomsterkte door direct gebruik te maken van de pads op de sensormodules. Dit geeft vanwege de grootte echter wel een beperking want hij is niet geschikt voor XT60-connectoren zoals de eerste versie. Om hoge stroombelastingen aan te kunnen, is een printontwerp met zes in plaats van twee lagen noodzakelijk (figuur 1).
- **AmpVolt v2.0B:** deze variant behoudt het compacte ontwerp van AmpVolt v1.0 terwijl direct solderen van de op ACS gebaseerde compacte stroommodules mogelijk is. Hij ondersteunt daarnaast ook XT60-connectoren op de print voor eenvoudige integratie. Voor de veiligheid raad ik echter sterk aan om de maximale piekbelasting te beperken tot 20 A om oververhitting en ontsnappen van 'magische' rook te voorkomen (figuur 2).
- **AmpVolt v2.0C:** net als v2.0B is deze versie speciaal ontworpen voor de compacte modules op basis van CT432/433-stroomsensoren, en net als bij v2.0B gelden dezelfde aanbevelingen voor wat betreft de belasting om een betrouwbare werking te garanderen en schade te voorkomen.

Deze drie varianten bieden veel flexibiliteit en er kan mee worden



Figuur 4. Schema van de AmpVolt v2.0B-variant.

voldaan aan uiteenlopende eisen voor diverse toepassingen (figuur 3).

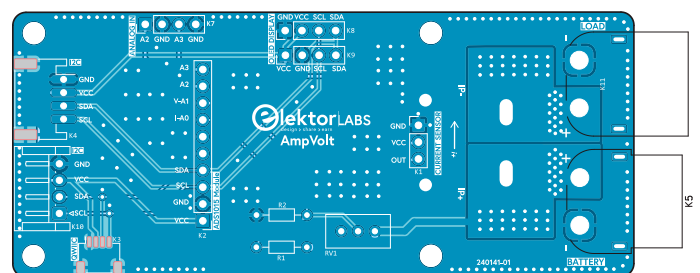
Ontwerpoverwegingen en uitdagingen

De integratie van de moderne sensormodules in het ontwerp was relatief eenvoudig dankzij de gedetailleerde ontwerpbestanden. Het ontwerpen van een robuuste en geoptimaliseerde printlayout vereiste echter zorgvuldige aandacht voor verschillende parameters. In het schema (figuur 4), is de principiële structuur van het originele ontwerp duidelijk te herkennen, maar met enkele updates. Om precies te zijn komt dit schema overeen met de B-variant, met de extra pads waardoor de sensormodule rechtstreeks op de printplaat kan worden gesoldeerd voor eenvoudige integratie (figuur 5). Voor degenen die geïnteresseerd zijn in de details of willen

voortbouwen op dit project zijn alle ontwerpbestanden, inclusief het schema, de printlayout en de firmware beschikbaar in de GitHub-repository van het project [7].

Een belangrijke aanpassing ten opzichte van het vorige ontwerp was het terugbrengen van de I²C-spoorbreedte naar 0,20 mm. Deze aanpassing minimaliseert ongewenste capaciteit die anders kan leiden tot verminderde signaalkwaliteit en zelfs communicatiefouten. In de B- en C-varianten zijn soldeer pads toegevoegd om de compacte sensormodules direct op de print te kunnen monteren. Dit laat ook de integratie toe van XT60-connectoren om grote stromen eenvoudig en betrouwbaar te kunnen verbinden. Het ontwerpen van een tweelaags print met een standaard koperdikte van 35 µm die tot 20 A aankan zonder oververhitting of veiligheidsrisico's bracht echter nog meer uitdagingen met zich mee.

Om dit aan te pakken, werden beide koperlagen gebruikt om de stroom gelijkmatig te verdelen en de warmte effectief te beheeren. Tussen de lagen werden thermische via's toegevoegd om de warmteafvoer te verbeteren en de stroom betrouwbaar aan te kunnen. Voor een 20A-belasting



Figuur 5. Print-layout van de AmpVolt v2.0B-variant.



Figuur 6. De AmpVolt v2.0A in actie – stroommeting tijdens het testen.

suggereren berekeningen dat ongeveer 10 via's met een gat van 0,4 mm en een uitwendige diameter van 0,8 mm voldoende zijn bij een stroomdichtheid van ongeveer 2 A per via. Om echter het zekere voor het onzekere te nemen en rekening te houden met onverwachte omstandigheden werden 37 via's geplaatst. Dit zorgt voor een nog betere stroomverdeling en vermindert het risico op oververhitting tijdens gebruik. De maximale stroom kan echter nog verder worden opgevoerd door de koperdikte te vergroten tot 70 μm wat de maximale stroom door de printsporen nog aanzienlijk kan vergroten. Voor de grootste stroomsterktes werden kopervlakken gebruikt, zodanig ontworpen dat de stroomdichtheid maximaal 35 $^{\circ}\text{C}$ temperatuurverhoging veroorzaakt volgens de IPC-2221 standaard, wat ervoor zorgt dat de temperatuur van de print binnen veilige waarden blijft.

Test van de AmpVolt v2.0

Voor het testen kon ik stromen tot 30 A meten met behulp van het DC-boogglasapparaat van een vriend. In mijn lab kon mijn voeding echter niet verder komen dan 6 A. In **figuur 6** is te zien dat het OLED-display een stroomverbruik van 6 A aangeeft. De spannings- en vermogensmeting op de AmpVolt geven 0 aan omdat ik bij deze test de XT60-connector spanningsmetingen niet heb aangesloten. Verder werkte het systeem zoals verwacht.

Aan de softwarekant vereiste de code slechts een kleine update om deze aan te passen aan de gevoeligheid van de gebruikte sensormodule. Elke module heeft een andere gevoeligheid (mV/A) waarmee rekening moet worden gehouden. In deze test gebruikte ik de CT433 Large Carrier-variant (**figuur 7**) met een gevoeligheid van 20 mV/A. Dit is de bijgewerkte `readCurrent()`-functie:

```
float readCurrent()
{
    int16_t val_1 = ADS.readADC(0);
    // Read ADC channel 0
    float f = ADS.toVoltage(1);
```

WEBLINKS

- [1] Saad Imtiaz, "AmpVolt: een modulaire DC-vermogensmeter (deel 1)"; Elektor mei/juni 2024: <https://www.elektormagazine.nl/magazine/elektor-343/62863>
- [2] Pololu Current Sensor modules: <http://www.pololu.com/category/118/current-sensors>
- [3] Allegro Current Sensors: <http://www.allegromicro.com/en/products/sense/current-sensor-ics/>
- [4] CT432/CT433 TMR Current Sensor Large Carriers: <http://www.pololu.com/category/324/ct432-ct433-tmr-current-sensor-large-carriers>
- [5] ACS72981 Current Sensor Compact Carriers: <http://www.pololu.com/category/316/acs72981-current-sensor-compact-carriers>
- [6] CT432/CT433 TMR Current Sensor Compact Carriers: <http://www.pololu.com/category/323/ct432-ct433-tmr-current-sensor-compact-carriers>
- [7] Broncode PCB-bestanden: <https://github.com/ElektorLabs/AmpVolt>
- [8] Allegro's XtremeSense™ TMR technology: <http://www.allegromicro.com/en/products/emerging-technologies/tmr>



```
// Convert ADC reading to voltage
float current = (val_1 * f - 1.650) / 0.020;
// Calculate current in amps
return current;
}
```

Hierin leest `ADS.readADC(0)` de ruwe ADC-waarde van kanaal 0, converteert `ADS.toVoltage(1)` de ADC-waarde in een spanning op basis van de referentiespanning en ADC-resolutie. `1.650` is de nulstroom-spanning van de aangesloten sensormodule (de uitvoer van de sensor als er geen stroom loopt). `0.020` is de gevoeligheid van de CT433-sensor, het getal betekent 20 mV/A. Deze waarden zijn specifiek voor elke module en bepalen hoe de gemeten spanning wordt omgerekend naar een stroom.

De functie berekent de stroom door eerst de nulstroom-spanning af te trekken van de door de sensor gerapporteerde spanning en dat resultaat vervolgens te delen door de gevoeligheid van de sensor. Deze wijziging maakt de code eenvoudig aanpasbaar aan verschillende sensormodules op voorwaarde dat de parameters ervan bekend zijn. **◀**

vertaling: Adrie Kooijman — 240672-03

Vragen of opmerkingen?

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

Over de auteur

Saad Imtiaz, Senior Engineer bij Elektor, is een mechatronica-ingenieur met uitgebreide ervaring in embedded systemen en productontwikkeling. Tijdens zijn carrière heeft hij samengewerkt met een breed scala aan bedrijven, van innovatieve startups tot gevestigde wereldwijde ondernemingen, en vooruitstrevende prototyping- en ontwikkelingsprojecten aangestuurd. Met een rijke achtergrond, waaronder een periode in de luchtvaartindustrie en leiderschap van een technologische startup, brengt Saad een unieke mix van technische expertise en ondernemersgeest mee naar zijn rol bij Elektor. Hier draagt hij bij aan projectontwikkeling in zowel software als hardware.

Project 2.0

correcties, updates en brieven van lezers

samengesteld door Jean-François Simon (Elektor)



Labvoeding

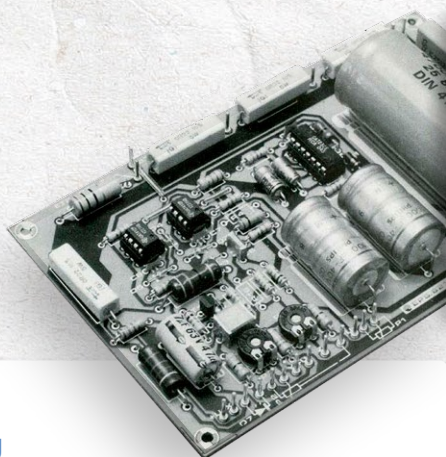
Elektuur december 1982, p. 60 (82178)

Ik wil graag de laboratoriumvoeding uit Elektuur december 1982 met mijn leerlingen bouwen. Is er ergens een mogelijkheid om de geëtste print te bestellen of op een andere manier te verkrijgen?

Holger Beck (Duitsland)

Bedankt voor uw interesse in dit klassieke project. Helaas, de printen zijn niet verkrijgbaar. Als u deze wilt laten maken, zijn er een paar mogelijkheden. U kunt de print helemaal opnieuw tekenen in uw favoriete PCB-software. Als u dat doet, raad ik u aan de footprints voor de axiale elektrolytische condensatoren te wijzigen en in plaats daarvan radiale te gebruiken, die zijn tegenwoordig goedkoper en gemakkelijker te vinden. U kunt een screenshot van het PDF-artikel gebruiken als sjabloon, bijvoorbeeld in Sprint Layout, dat een speciale functie daarvoor heeft, of in KiCad met behulp van de ingebouwde Image Converter. U moet pixels tellen tussen punten die een bekende afstand hebben (bijvoorbeeld tussen pin 1 en 7 van IC1) om de juiste schaal te berekenen die nodig is bij het importeren naar KiCad. Wanneer u klaar bent met hertekenen, kunt u exporteren naar Gerber en de printen laten produceren door de leverancier van uw keuze. Veel succes!

Jean-François Simon (Elektor)



KiCad 8

Elektor november/december 2024, p. 22 (240278)

Ik heb me enthousiast verdiept in KiCad, maar nu heb ik een probleem. Om te voorkomen dat ik met meerdere bestanden tegelijk moet werken, heb ik een samengesteld project gemaakt met meerdere schemabladen. Elk schemablad bevat een apart schema dat overeenkomt met een dochterboard. Deze worden allemaal aangesloten op een hoofdboard. Met deze configuratie kan ik echter geen aparte layout maken voor elk board in de PCB-editor. Dit wordt ook weerspiegeld in de 3D-viewer. Als u een oplossing voor het bovenstaande hebt, zou ik u zeer dankbaar zijn.

Hans-Joachim Petzky (Duitsland)

Voor zover ik weet, is het niet mogelijk met KiCad te werken op de manier die u wilt. Hoewel het schema van een board over meerdere bladen verdeeld kan zijn (om te helpen met de organisatie), kan het slechts één layout hebben. Ik hoop dat dit helpt!

Peter Dalmaris (auteur van het artikel)

Ik denk dat het makkelijker zou zijn als u uw project organiseert met submappen voor elke print. Elke map kan de schemabestanden (.kicad_sch) en het PCB-bestand (.kicad_pcb) bevatten voor een specifieke print. Helaas voldoet dit niet aan uw wens om het aantal bestanden te minimaliseren – sorry daarvoor!

Jean-François Simon (Elektor)

Ideeën of feedback?
 Hebt u een goed idee of waardevolle feedback voor Elektuur? Neem contact met ons op via redactie@elektor.com.
 We horen graag van u!



Draadloze nooddruknop

Elektor juli/augustus 2023, p. 20 (200578)

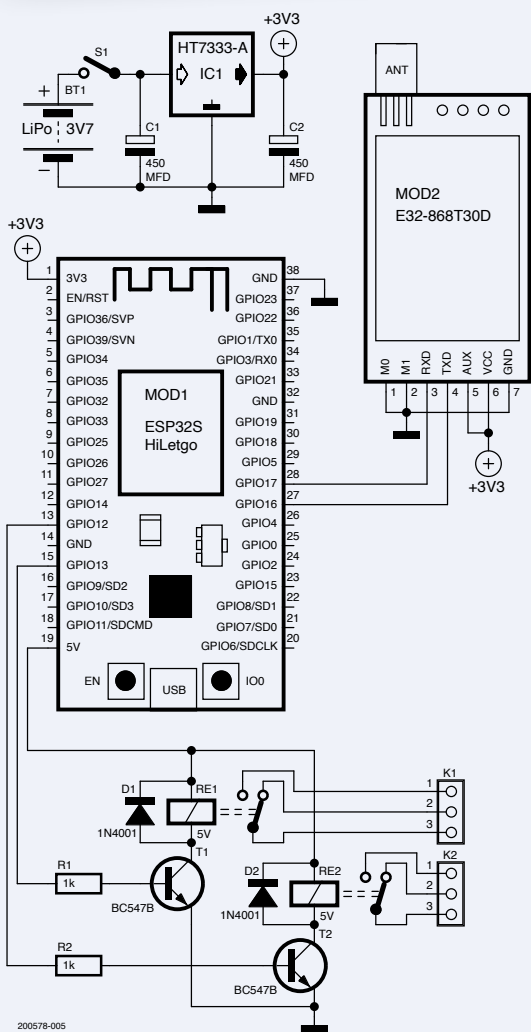
Helaas gaat de voorbeeldcode niet in op het probleem van verhoogde beveiliging met LoRa. Citaat: "Naast het gebruik van storingsbestendige spread-spectrumtechnologie bieden ze nog drie parameters: kanaalfrequentie, air rate en een 4-byte-ID. Communicatie is alleen mogelijk als deze drie parameters aan beide zijden van de verbinding gelijk zijn." Juist deze punten ontbreken in het artikel! Hiervoor zou een initialisatie van de E32-module via Serial2 moeten worden uitgevoerd. Kunt u dit verduidelijken?

Hanspeter Schären (Zwitserland)

Deze E32-modules worden normaal gesproken geconfigureerd met behulp van een klein, speciaal softwareprogramma van Ebyte, de fabrikant van de module. Hiermee kunt u de baudrate, het vermogen, het adres, het kanaal enzovoort instellen. U hebt een USB/serieel-adaptor nodig op basis van een FT232RL of een soortgelijk IC. Documentatie voor de

module is te vinden op <https://eltsi.ru/upload/files/E32-868T30D.pdf>. De downloadpagina van de fabrikant is www.ebyte.com/Resources-Download. Nadat u de twee modules met identieke instellingen hebt geconfigureerd, wordt de draadloze seriële linkverbinding tussen de twee E32-modules automatisch tot stand gebracht. Dus als u de moeite neemt om de E32-modules van tevoren te initialiseren, hoeft u dit later in de code niet te doen, daarom wordt deze configuratie niet gedaan door het programma dat gedownload kan worden van de webpagina bij het artikel. Het is natuurlijk ook mogelijk om de modules rechtstreeks te configureren via de seriële interface van een microcontroller aan beide kanten van de link. Alle configuraties die via de Ebyte-software worden uitgevoerd, zijn gecodeerd in 5 bytes, die via Serial.print of andere middelen kunnen worden verzonden. Een video op www.youtube.com/watch?v=FB-ePscCcOU illustreert de procedure duidelijk. De auteur van de video gebruikt een op Forth gebaseerde microcontroller, die niet zo gebruikelijk is, maar u kunt de procedure natuurlijk eenvoudig aanpassen met Arduino- of ESP32-code.

Jean-François Simon (Elektor)



200578-005



Dogan Ibrahim, LTspice Essentials, Elektor, 2024

Ik ben dit uitstekende boek aan het doornemen en stuitte op een klein probleem in hoofdstuk 7: "Thyristors, Diacs and Triacs - Importing a SPICE model". Ik heb de benodigde bestanden voor de diac en de triac gedownload van ST en geïmporteerd, maar toen de schakeling werd uitgevoerd, verscheen er een foutmelding over een foutieve '*' in de code. Ik ontdekte uiteindelijk dat het de diac-code was die de fout veroorzaakte. Het probleem werd veroorzaakt door een typefout in de STMicro diac spice modelbibliotheek `st_diacs.lib`.

Regel 79 van dit bestand luidt:

```
R_R1 N02098 TRG 1.462*{Tr}
```

maar dit zou moeten zijn:

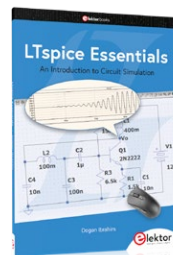
```
R_R1 N02098 TRG {1.462*Tr}
```

Ik hoop dat dit andere lezers van het boek kan helpen!

Adrian Hirst

Hartelijk dank voor deze zeer waardevolle feedback! Dit zal inderdaad nuttig zijn voor anderen. Het is jammer dat ST deze fout in het bestand heeft laten sluipen, maar het is heel goed dat u de fout hebt kunnen vinden en oplossen!

Jean-François Simon (Elektor)



Ethische transparantie ontsluierd

inzichten uit het Ethics in Electronics 2024 onderzoek



Het Elektor Content Team

Een onderzoek uit 2024 van Ethics in Electronics (EiE) brengt aanzienlijke hiaten in de transparantie binnen de elektronica-industrie aan het licht. Projectleider Niek Poortman deelt de belangrijkste bevindingen en bespreekt de stappen die bedrijven moeten nemen om te voldoen aan de toenemende ESG-normen.

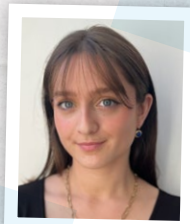
▲ Niek Poortman (projectleider, EiE).

De elektronicasector wordt steeds kritischer op het gebied van ethiek en duurzaamheid. Uit het onderzoek Ethics in Electronics (EiE) 2024 blijkt dat er aanzienlijke hiaten zijn in de transparantie van elektronica-bedrijven. In dit interview bespreekt Niek Poortman, projectleider van EiE, de belangrijkste bevindingen van het onderzoek en wat bedrijven moeten doen om te voldoen aan de veranderende ESG-normen.

Vanaf januari 2025 zal Morgan de Saint Jorre zich bij de Lenthe Foundation voegen als tweede projectleider van het EiE-project. Het bestuur bedankt Niek voor het managen van het onderzoek met de electronica-exposanten en voor zijn inspanningen om ethische bedrijfscommunicatie onder directeuren en CEO's te prioriteren. Morgan zal haar rol bij de Lenthe Foundation beginnen door communicatiemanagers en besluitvormers op M- en C-niveau te mobiliseren om ten minste € 4.000 te investeren in het produceren van een eerlijk, objectief ethisch profiel om op hun websites te publiceren.

CONTACT:

Morgan de Saint Jorre, Elektor
morgan.saintjorre@elektor.com



Elektor: Kunt u ons, voordat we in de details duiken van EiE's 2024-onderzoek, iets vertellen over Ethics in Electronics als organisatie?

Poortman: Ethics in Electronics is opgericht in 1994, als onderdeel van Stichting Lenthe (noot van de redactie: Lenthe is de bedrijfsstichting van Elektor), jaren voordat de elektronica-industrie zich begon te bekommeren om ethiek en/of duurzaamheid. Ethics in Electronics zorgde voor bewustwording door columns en artikelen te schrijven in Elektor, een tijdschrift en platform voor Europese ingenieurs. Tegenwoordig ondersteunt Lenthe communicatiemanagers van middelgrote bedrijven met onderzoek, inhoud en prijzen. Onze ambitie is om hen te inspireren en te helpen bij het maken van transparante (interne en externe) bedrijfsethische communicatie.

Elektor: Wat waren de belangrijkste doelstellingen die u in gedachten had toen u de EiE-enquête 2024 opstelde? Wat hoopte u aan het licht te brengen?

Poortman: Toen we de 2024-enquête voor Ethics in Electronics oopzetten, was ons belangrijkste doel om een duidelijker inzicht te krijgen in de manier waarop bedrijven in de elektronicasector communiceren over hun inzet voor ethiek en duurzaamheid. Met de aankomende wettelijke vereisten rondom ESG-rapportage, met name voor grote bedrijven met



meer dan 500 werknemers en binnenkort ook voor het MKB in 2025, wilden we beoordelen in hoeverre bedrijven voorbereid waren op deze verschuivingen. Het doel was om te ontdekken in hoeverre deze bedrijven transparant zijn over belangrijke aspecten, zoals hun ethische verplichtingen, duurzaamheidspraktijken, werknemersrelaties en omzet en of ze rapporten publiceren zoals jaarverslagen of duurzaamheidsverslagen. We wilden ook zien hoe goed deze bedrijven aansluiten bij opkomende trends en verwachtingen van belanghebbenden, zoals de integratie van Sustainable Development Goals (SDG's).

Door 100 exposanten op Messe München 2024 te beoordelen, hoopten we de sterke en zwakke punten van de sector op dit gebied aan het licht te brengen en bedrijven de kans te bieden om hiaten in hun eigen communicatie te identificeren en hun transparantie te verbeteren. Uiteindelijk was het ons doel om inzichten te verschaffen die bedrijven zouden helpen om niet alleen aan hun wettelijke verplichtingen te voldoen, maar ook om hun marktpositie, geloofwaardigheid en aantrekkelijkheid voor werknemers, klanten en belanghebbenden te verbeteren.

Elektor: Hoe hebt u de bedrijven geselecteerd die hebben deelgenomen aan het 2024-onderzoek? Was er een bepaald criterium of segment van de elektronica-industrie waar u zich op richtte?

Poortman: Voor de enquête over 2024 hebben we ons specifiek gericht op exposanten van electronica 2024 in Messe München. Onze focus lag op Europese MKB-bedrijven (kleine en middelgrote ondernemingen) binnen de elektronicasector. De bedrijven die we hebben opgenomen, zijn willekeurig geselecteerd binnen dit criterium.

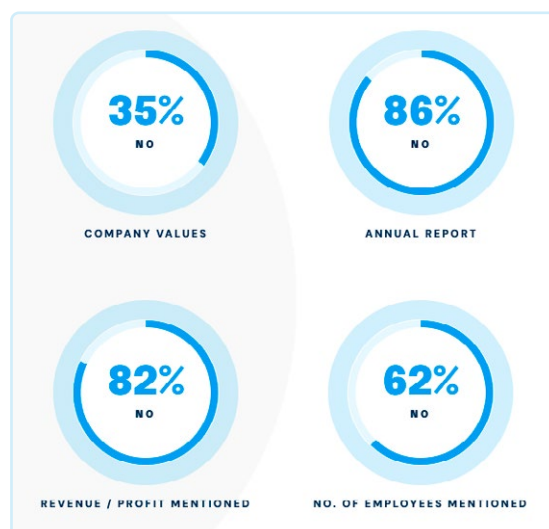
De beslissing om ons te richten op het MKB in Europa was heel bewust. We wilden beoordelen hoe goed middelgrote bedrijven – vaak de ruggengraat van de sector – zich voorbereiden op de komende veranderingen in de regelgeving met betrekking tot ESG- en duurzaamheidsrapportage. Hoewel grotere bedrijven mogelijk al rapportagemechanismen hebben ingesteld, waren we vooral geïnteresseerd in MKB-bedrijven omdat zij mogelijk voor grotere uitdagingen staan bij de aanpassing aan deze nieuwe vereisten. Door ons te concentreren op Europese bedrijven, erkenden we ook het strengere nalevingslandschap in de EU, die vaak de norm bepaalt voor wereldwijde inspanningen op het gebied van duurzaamheid.

Ons doel was om te zien hoe deze MKB-bedrijven, die een cruciale rol spelen bij het stimuleren van innovatie binnen de elektronica-industrie, zichzelf positioneren op het gebied van ethische en duurzame praktijken en hoe ze deze inspanningen zowel publiekelijk als binnen hun netwerken van belanghebbenden communiceren.

Elektor: Uit uw onderzoek bleek dat slechts 16% van de bedrijven expliciet verwijst naar de Sustainable Development Goals (SDG's) van de VN op hun websites. Waarom denkt u dat er zo weinig aansluiting is bij deze wereldwijde duurzaamheidsnormen?

Poortman: Het lage percentage bedrijven dat expliciet verwijst naar de SDG's weerspiegelt waarschijnlijk een paar belangrijke factoren. Ten eerste, hoewel de SDG's algemeen erkend worden als wereldwijde duurzaamheidsnormen, kunnen veel bedrijven – vooral in het MKB – worstelen met de vraag hoe ze deze bredere doelen in hun specifieke bedrijfsmodellen en activiteiten kunnen integreren. Voor kleinere bedrijven kan het afstemmen op de SDG's lijken op een extra laag van complexiteit, vooral als ze niet beschikken over de middelen of expertise om deze mondiale doelstellingen te verbinden met hun dagelijkse activiteiten. Ten tweede zijn veel bedrijven bezig met duurzame praktijken zonder deze expliciet in de context van de SDG's te plaatsen. Ze kunnen zich bezighouden met zaken als het verminderen van koolstof-footprints, het verbeteren van arbeidspraktijken of het vergroten van transparantie, maar gebruiken niet noodzakelijkerwijs de taal van de SDG's in hun communicatie. Dit kan te wijten zijn aan een gebrek aan bewustzijn of gewoon aan een kloof tussen hun acties en de manier waarop ze hun duurzaamheidsinspanningen in de markt zetten.

Tot slot kunnen MKB-bedrijven het gevoel hebben dat aanpassing aan dergelijke wereldwijde standaarden relevanter is voor grotere bedrijven met een groter wereldwijd bereik. Maar met de toenemende nadruk op transparantie en naleving, vooral in Europa, is er een duidelijke kans voor bedrijven van elke omvang om hun communicatie te verbeteren en te laten zien hoe hun inspanningen bijdragen aan bredere maatschappelijke doelen, zoals de SDG's. Naarmate



Uit een steekproef onder 100 Europese exposanten kwamen een aantal opvallende bevindingen naar voren (bron: EiE).

de regelgeving voor naleving strenger wordt, verwachten we dat meer bedrijven het belang inzien van het afstemmen van hun strategieën op internationale normen zoals de SDG's.

Elektor: Een van de belangrijkste bevindingen was dat slechts 14% van de bedrijven hun jaarverslagen openbaar maken. Wat zijn de potentiële risico's voor bedrijven die niet transparant zijn over hun financiële gezondheid?

Poortman: Bedrijven die hun jaarverslagen niet openbaar maken, lopen het risico het vertrouwen te verliezen van belangrijke belanghebbenden zoals investeerders, klanten en werknemers, die steeds meer belang hechten aan transparantie en verantwoording. In een concurrerende markt kan niet-transparantie de reputatie van een bedrijf schaden en groei mogelijkheden beperken. Bovendien kunnen bedrijven die niet proactief zijn in het delen van financiële en duurzaamheidsinformatie door de strengere ESG-regelgeving, vooral in Europa, te maken krijgen met nalevingsproblemen, waardoor ze minder aantrekkelijk worden voor zowel partners als talent.

Elektor: U hebt ontdekt dat 62% van de bedrijven het aantal werknemers niet bekendmaakt. Waarom zou dit een probleem kunnen zijn? Denkt u dat dit gebrek aan transparantie een negatieve invloed heeft op de perceptie van een bedrijf bij potentiële werknemers en andere belanghebbenden?

Poortman: Het gebrek aan informatie over werknemers kan zorgen baren over transparantie en vertrouwen, vooral voor potentiële werknemers en belanghebbenden die op zoek zijn naar inzicht in het personeelsbestand van een bedrijf. Voor werkzoekenden kan kennis van de grootte van een bedrijf van invloed zijn op hun beslissing om te solliciteren, omdat het vaak een weerspiegeling is van de middelen, de groei-

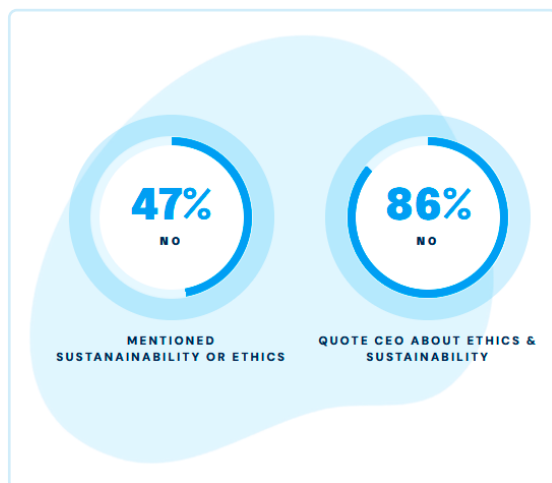
gelijkheden en de bedrijfscultuur. Voor belanghebbenden, vooral degenen die zich richten op ESG-factoren, zijn personeelsgegevens essentieel voor het evalueren van de sociale impact van een bedrijf en de relaties met werknemers. Het niet bekendmaken van deze informatie kan een bedrijf geheimzinnig of minder verantwoordelijk doen lijken, wat de reputatie en aantrekkelijkheid in een concurrerende markt kan schaden.

Elektor: U hebt in 2022 een vergelijkbaar onderzoek uitgevoerd en de resultaten voor 2024 laten weinig verbetering zien op het gebied van transparantie. Waarom denkt u dat elektronicabedrijven moeite hebben om vooruitgang te boeken op dit gebied, ondanks de toenemende druk van regelgevende instanties en belanghebbenden?

Poortman: Ondanks de toenemende druk van regelgeving en belanghebbenden worstelen veel elektronicabedrijven waarschijnlijk met transparantie vanwege de complexiteit van het afstemmen van interne processen op nieuwe rapportagenormen. Het implementeren van transparante ESG- en financiële verslaglegging vergt veel tijd, middelen en expertise, vooral voor MKB-bedrijven, die vaak niet over de infrastructuur van grotere bedrijven beschikken. Daarnaast kan er aarzeling of onzekerheid bestaan over hoe deze informatie het beste openbaar kan worden gemaakt zonder het concurrentievoordeel in gevaar te brengen. Naarmate de regelgevende kaders zich ontwikkelen, zijn veel bedrijven misschien nog bezig zich aan te passen, wat de trage vooruitgang verklaart ondanks de druk van buitenaf.

Elektor: Er was weinig steun voor ethisch leiderschap: slechts 14% van de bedrijven had een uitspraak van een CEO over ethiek en duurzaamheid. Hoe belangrijk denkt u dat zichtbare ondersteuning van leiderschap is bij het opbouwen van vertrouwen bij belanghebbenden?

Poortman: Zichtbare steun van het leiderschap, zoals een CEO die ethiek en duurzaamheid onderschrijft, speelt een cruciale rol bij het opbouwen van vertrouwen bij belanghebbenden. Als leiders zich openlijk uitspreken voor ethische waarden, geeft dit werknemers, investeerders en klanten het signaal dat deze prioriteiten integraal deel uitmaken van de missie van het bedrijf. Het bevordert de geloofwaardigheid en toont een top-down toewijding aan duurzaamheid die verder gaat dan naleving. Zonder deze zichtbare ondersteuning kunnen belanghebbenden zich afvragen of ethische initiatieven oppervlakkig zijn of echte steun ontberen, wat de reputatie van het bedrijf kan ondermijnen en het vermogen om zinvol samen te werken met doelgroepen die ethische bedrijfspraktijken belangrijk vinden.



► Ruwweg 47% communiceert over duurzaamheid of ethiek, terwijl slechts 14% een CEO-citaat bevat waarin deze cruciale onderwerpen aan bod komen (bron: EIE).



Elektor: Welke rol kan de Ethics in Electronics-organisatie spelen om elektronicabedrijven te helpen de communicatiekloof te overbruggen, met name met diensten als het Ethisch Profiel?

Poortman: Ethics in Electronics speelt een cruciale rol bij het helpen van elektronicabedrijven om de communicatiekloof over ethiek en duurzaamheid te dichten, met name via diensten als het Ethisch Profiel. Deze dienst biedt bedrijven een gestructureerde, redactionele aanpak voor het delen van hun ethische verplichtingen en duurzaamheidsinspanningen. Met de toenemende eisen op het gebied van regelgeving, zoals ESG-rapportage en afstemming op de SDG's, hebben bedrijven vaak moeite om een duidelijk, uitgebreid beeld te geven van hun initiatieven. Het Ethisch Profiel belicht niet alleen de acties van een bedrijf, maar zorgt er ook voor dat deze inspanningen effectief worden gecommuniceerd via de belangrijkste platforms – via de website van het bedrijf, sociale media, bedrijfsrapporten of opname in de Ethische Gids 2025. Dit vergroot de zichtbaarheid en geloofwaardigheid onder belanghebbenden, van klanten tot investeerders, die ethiek en duurzaamheid steeds belangrijker vinden in hun besluitvorming.

Bovendien helpt het Ethisch Profiel bedrijven vertrouwen op te bouwen door hen te begeleiden bij het invoeren van best practices op het gebied van transparantie en verantwoord ondernemen. Ethics in Electronics biedt inzichten op basis van industriebenchmarking en helpt bedrijven om hiaten in hun communicatie te identificeren en de manier waarop ze hun waarden uitdragen te verbeteren. Door hun ethische praktijken openbaar te maken, kunnen bedrijven zich onderscheiden op de markt, potentiële werknemers aantrekken en hun reputatie als leiders op het gebied van verantwoorde innovatie verstevigen. Deze service biedt niet alleen naleving van regelgeving, maar ook een concurrentievoordeel door bedrijven te positioneren als betrouwbaar en toekomstgericht.

Elektor: Wat is volgens u in de toekomst de grootste uitdaging voor elektronicabedrijven op het gebied van ethiek en duurzaamheidscommunicatie?

Poortman: Als we naar de toekomst kijken, zal de grootste uitdaging voor elektronicabedrijven op het gebied van communicatie over ethiek en duurzaamheid waarschijnlijk bestaan uit het handhaven van transparantie en tegelijkertijd voldoen aan de steeds complexere wettelijke vereisten en verwachtingen van belanghebbenden. Naarmate ESG-rapportage meer gestandaardiseerd en gedetailleerder wordt, zullen bedrijven manieren moeten vinden om hun interne processen af te stemmen op deze kaders, terwijl ze er ook voor moeten zorgen dat hun communicatie duidelijk, geloofwaardig en authentiek is. De balans vinden tussen naleving van de regelgeving en zinvolle, boeiende communicatie die aanslaat bij klanten, investeerders en werknemers zal cruciaal zijn.

Naarmate het publiek beter geïnformeerd en kritischer wordt over ethische praktijken, zullen bedrijven bovendien voor de uitdaging komen te staan om 'greenwashing' te vermijden – het maken van oppervlakkige beweringen over duurzaamheid zonder inhoudelijke onderbouwing. Elektronicabedrijven zullen concreet bewijs moeten leveren van hun initiatieven en meetbare effecten moeten aantonen, terwijl ze moeten concurreren om aandacht in een markt die steeds meer verzadigd raakt met duurzaamheidsboodschappen. Om vertrouwen op de lange termijn op te bouwen en het concurrentievoordeel te behouden, is het van cruciaal belang dat hun communicatie oprecht en datagestuurd blijft, terwijl deze ook in lijn moet zijn met de wereldwijde duurzaamheidsdoelstellingen. ◀

Noot van de redactie: Elektor en eeNews Europe : vertrouwde mediapartners van Ethics in Electronics – zijn geïnteresseerd in het stimuleren van ethische innovatie in elektronica. Ethics in Electronics is opgericht in 1994. Producent Lenthe Foundation begon in dat jaar met bewustmaking door middel van populaire columns en artikelen in Elektor.

240631-03



Empowering Ethical Communication in the European Electronics Industry.

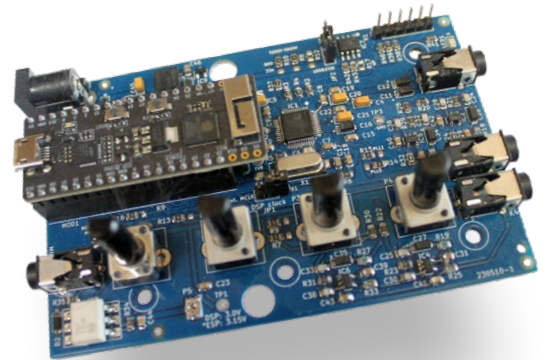


Het Ethiek in Elektronica-team (bron: EIE).



Elektor Audio DSP FX Processor Board

deel 2: toepassingen maken



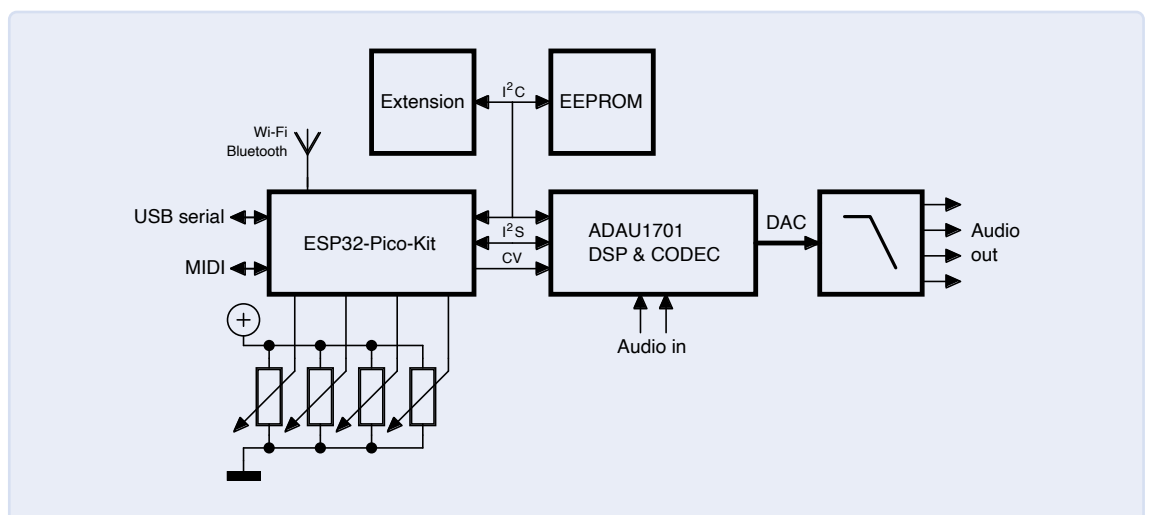
Clemens Valens (Elektor)

Het Elektor Audio DSP FX Processorboard combineert een krachtige ESP32-microcontroller met een ADAU1701 audio-DSP. Samen maken ze hoogwaardige toepassingen voor het genereren en verwerken van audio mogelijk. In het eerste deel van het project hebben we het board en zijn functies gepresenteerd. We hebben ook laten zien hoe men een ontwikkelsysteem opzet om toepassingen voor het board te maken. In dit tweede deel gaan we dieper in op het ontwikkelen van toepassingen.

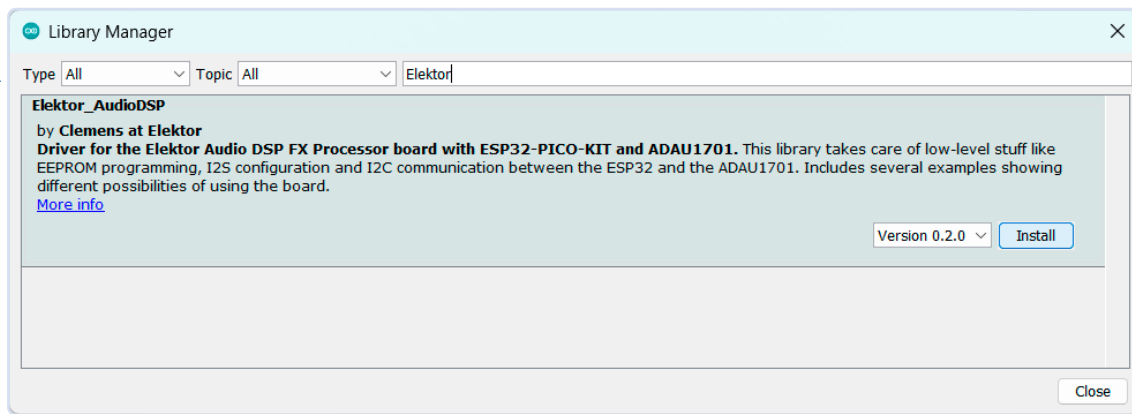
Het Elektor Audio DSP FX Processor Board is in wezen een ESP32-microcontroller die is uitgebreid met audio-ingangen en -uitgangen van hoge kwaliteit. Wat dit board onderscheidt van andere is de geïntegreerde DSP, die onafhankelijk audio kan verwerken. Deze functie voegt zowel kracht als flexibiliteit toe aan het board, waardoor het zeer veelzijdig is. In het vorige artikel [1] zijn we dieper ingegaan op het ontwerp van het board. Nu richten we ons op de softwarekant van het systeem.

Voor het gemak, als oprisser of geheugensteuntje, hebben we het blokschema van het Audio DSP FX Processor Board nogmaals getekend in **figuur 1**. Het toont de twee processoren, hoe ze met elkaar verbonden zijn en hoe de periferie aangesloten is. Voor meer details over het ontwerp van de Audio DSP FX Processor en zijn toepassingen, verwijzen we naar deel 1 van deze serie [1].

Toepassingen voor de Audio DSP FX Processor kunnen vanaf de grond worden opgebouwd, worden overgezet van een ander platform of project, of door een van de voorbeeldprogramma's aan te passen.



Figuur 1. Het functionele blokschema van de Audio DSP FX Processor.



Figuur 2. De Elektor_AudioDSP-bibliotheek is beschikbaar in de bibliotheekmanager van de Arduino IDE.

Toepassingen bestaan in de meeste gevallen uit een ESP32-programma samen met een ADAU1701 DSP-algoritme. ESP32-programma's worden op de gebruikelijke manier gemaakt (met Arduino [2], ESP-IDF enzovoort), terwijl DSP-programma's worden gebouwd in SigmaStudio 4.7, een gratis visuele programmeeromgeving van Analog Devices. Hiermee kan men ADAU1701-programma's maken door algoritmeblokken met virtuele draden op een canvas met elkaar te verbinden. Er bestaan twee versies van SigmaStudio, een nieuwe versie (*SigmaStudio+*) en een oude versie (*SigmaStudio*). We zijn genoodzaakt om de oude versie (4.7) te gebruiken, omdat SigmaStudio+ de ADAU1701 (helaas) niet ondersteunt.

Arduino

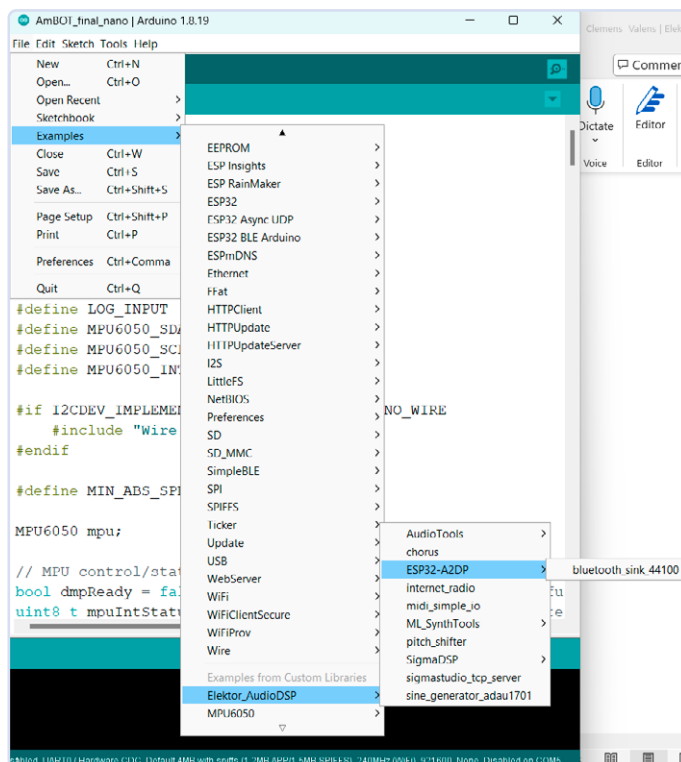
Om de ontwikkeling van Arduino-programma's te vereenvoudigen, hebben we de *Elektor_AudioDSP*-bibliotheek gemaakt ([3], zie **figuur 2** en het kader **Het ESP32 Boards Package**). Deze bibliotheek handelt de meeste low-level operaties van het board af, zoals EEPROM programmeren en updaten, en het routeren van potentiometer- en MIDI-data. Samen met bepaalde bibliotheken van derden (zie de voorbeelden in de bibliotheek, **figuur 3**) geeft hij toegang tot het besturen van de DSP en zelfs het programmeren ervan. De bibliotheek exporteert ook enkele constanten die bedoeld zijn om het porten van andere I²S-gebaseerde audio-toepassingen (zoals in het voorbeeld *ml_synth_organ*) naar het board te vereenvoudigen.

Een toepassing die gebruik maakt van de *Elektor_AudioDSP*-bibliotheek begint met het maken (instantiëren) van een object van de *Elektor_AudioDSP*-klasse. In het geval dat de ESP32 I²S-data naar de DSP moet sturen, dan kan de toepassing in plaats daarvan een *Elektor_AudioDSP_I2S_Out* object maken, omdat dit enkele I²S-hulpfuncties verschaft. Zie het bestand *Elektor_AudioDSP.h* voor details over de beschikbare methoden en eigenschappen van het object.

Met de *begin()*-methode van het object kan een EEPROM-bestand voor de DSP worden gespecificeerd dat alleen wordt geprogrammeerd als dat nodig is. Verder worden de potentiometers, de DAC-multiplexer en de MIDI-poort geconfigureerd. Het onderstaande codefragment laat zien hoe een *audiodsp*-object van de *Elektor_AudioDSP*-klasse wordt gedeclareerd en ingezet. De DSP-firmware die in het fragment wordt gebruikt, maakt deel uit van de collectie die is opgenomen in de bibliotheek.

```
#define SAMPLE_RATE (48000)
#include "Elektor_AudioDSP.h"
Elektor_AudioDSP audiodsp = Elektor_AudioDSP();

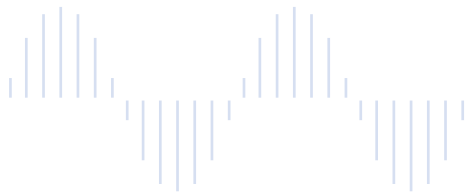
void setup(void)
{
```



Figuur 3. De *Elektor_AudioDSP*-bibliotheek bevat een aantal voorbeelden om u op weg te helpen. Hier leest u waar ze te vinden zijn.

Het ESP32 Boards Package

Om de ESP32-module met de Arduino IDE te kunnen gebruiken, moet eerst het ESP32 Boards Package worden geïnstalleerd. Raadpleeg [2] voor meer informatie over hoe dit moet. Merk op dat het sterk aanbevolen wordt om een versie vóór 3.0.0 te installeren (bijvoorbeeld 2.0.17) omdat bepaalde stuurprogramma's volledig herzien zijn in versie 3.0.0 (zoals I²S, ADC en DAC). Het zal even duren voordat andere bibliotheken die deze randapparatuur gebruiken de wijzigingen geïntegreerd hebben en weer zonder fouten compileren. We hebben ook ernstige code bloating waargenomen met applicaties die gebaseerd zijn op versie 3.0.x die niet in het geheugen van de ESP32-module passen. Met name de Bluetooth-voorbeelden lijden onder deze update.



```

audiodsp.begin(
  ADAU1701_firmware_i2s_pass_through_48000,
  ADAU1701_FIRMWARE_I2S_48000_SIZE);
}

void loop(void)
{
  // Read potentiometer P1 (returns a 12-bit value)
  uint16_t p1 =
    audiodsp.potentiometer[audiodsp.P1].read();
  p1 >>= 4; // Scale down
           // because DAC is only 8-bit

  // Send to DSP pin MP9,
  // but only if the value has changed.
  if (audiodsp.dac[audiodsp.MP9] != p1)
  {
    audiodsp.dac[audiodsp.MP9] = p1;
  }
  audiodsp.dac.refresh(); // Call regularly

  if (audiodsp.midi.available())
  {
    /* do something with MIDI data */
  }

  // etc.
}

```

JP1 – DSP-kloksignaal

Als de ESP32 en de ADAU1701 geen audiodata hoeven uit te wisselen via de I²S-bus, is het het eenvoudigst om de DSP een eigen kloksignaal te geven in de vorm van kristal X1. Hiervoor moet JP1 in stand X1 staan (pinnen 1 en 2).

Als het board gebruikt wordt in een configuratie waarbij de DSP een I²S-slave is, moet de ESP32 (de I²S-master) een MCLK-sig-naal leveren met een frequentie die precies 256 keer hoger is dan de samplerate die gebruikt wordt in SigmaStudio. Als deze verhouding iets anders is, zal de DSP geen audio uitvoeren. Natuurlijk moet de I²S-master dezelfde samplerate gebruiken op de I²S-bus. Het MCLK-sig-naal moet worden uitgevoerd op IO0 van de ESP32 en jumper JP1 moet in de positie *ext. MCLK* (pinnen 2 en 3) geplaatst worden.

Aangezien de ESP32 de klok levert aan de DSP, zal deze laatste niets doen voordat het kloksignaal aanwezig is. Bovendien kan de DSP ongedefinieerd gedrag vertonen gedurende configuratie van de klok of als deze instabiel is. Houd daarom de DSP in resettoestand totdat de I²S-bus goed geconfigureerd is. U kunt dit doen door poort IO12 van de ESP32 laag te trekken tijdens de I²S-configuratie en weer hoog te maken zodra de bus gereed is. Het *bluetooth_sink_44100* voorbeeld laat zien hoe dit gedaan kan worden.

JP2 – DSP-selfboot of niet?

De ADAU1701 DSP is in staat om stand alone te werken, maar dat moet hem worden verteld. Deze modus heet *Selfboot* en wordt geselecteerd met jumper JP2 (pinnen 2 en 3) of R12. In de Selfboot-modus en met een geldig kloksignaal laadt de ADAU1701 een programma en voert dat uit telkens als hij wordt gereset (bijvoorbeeld bij het opstarten). In deze modus is een hostprocessor zoals de ESP32 niet nodig, maar kan handig zijn om de ADAU1701 via de I²C-poort aan te sturen.

In de selfboot modus verwacht de DSP dat er een programma is opgeslagen in een EEPROM waartoe het toegang heeft. In het geval van de Audio DSP FX Processor moet de EEPROM zich op de I²C-bus bevinden op adres 0x50 (in 7-bit formaat).

Als JP2 op pinnen 1 en 2 staat, dus niet selfboot, dan zal de DSP niet proberen zelf een programma te laden en in plaats daarvan wachten tot een host iets uploadt. Dit gaat weer via de I²C-bus en de ESP32 kan hiervoor zorgen. Het *sigmastudio_tcp_server*-voorbeeld laat zien hoe dit gedaan kan worden.

Dit zou allemaal eenvoudig zijn geweest als de formaten van het Selfboot EEPROM-bestand en het bestand dat door de host wordt gebruikt om de DSP te programmeren (het host boot-programma) hetzelfde waren geweest, maar dat zijn ze niet. Noch het branden van een host boot programma in de EEPROM, noch het uploaden van een Selfboot EEPROM-bestand in Host-boot modus zal resulteren in een werkende DSP.

Of het nu in selfboot-modus is of niet, er is altijd een klokbron nodig. Bij afwezigheid van een hostprocessor is dit kristal X1 (JP1 op pinnen 1 en 2). Als de host een kloksignaal levert, dan zal de DSP niet opstarten voordat dit signaal aanwezig is. Dit klinkt logisch, maar wordt gemakkelijk vergeten. Controleer daarom eerst de DSP-klok als een toepassing niet werkt zoals verwacht.

SigmaStudio

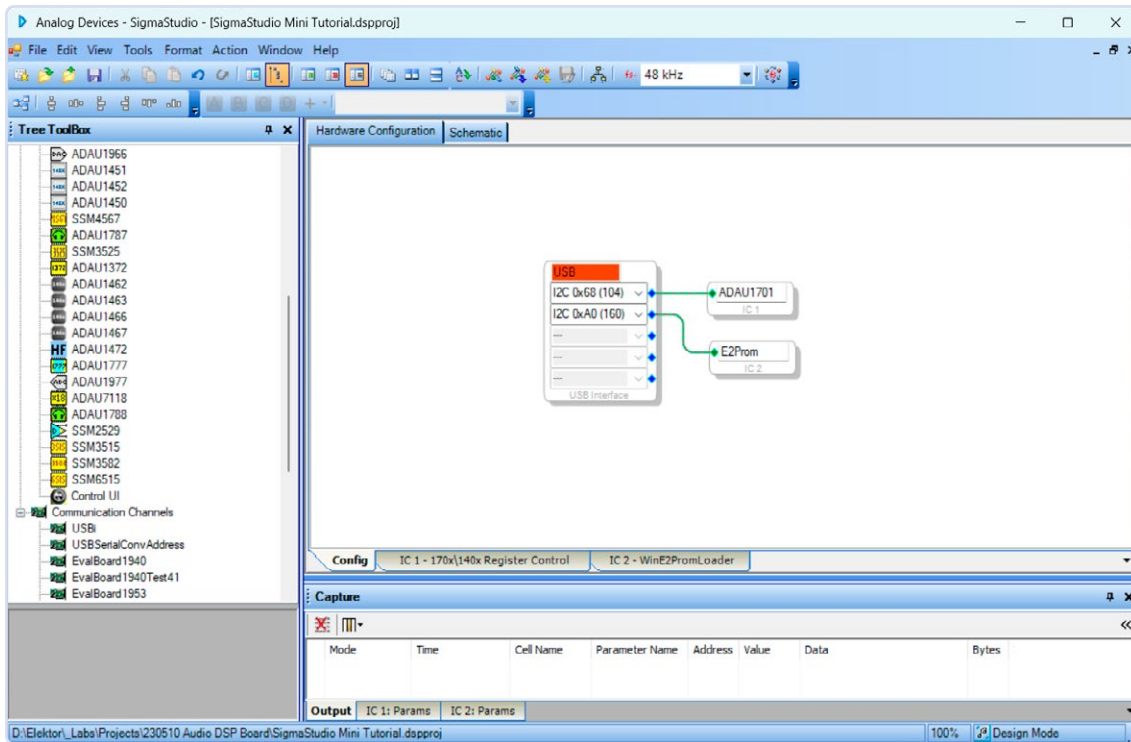
Programma's voor de ADAU1701-DSP worden gemaakt met SigmaStudio. Dit is een gratis visuele programmeeromgeving waarin men DSP-algoritmeblokken op een canvas kan plaatsen en ze met virtuele draden kan verbinden om complexere algoritmen te bouwen. De tool bevat een bibliotheek met voorgedefinieerde algoritmen. Zoals gezegd moeten we voor de Audio DSP FX Processor SigmaStudio 4.7 gebruiken en niet SigmaStudio+, omdat die de ADAU1701 niet kent.

Zorg ervoor dat het Audio DSP Board correct geconfigureerd is voor het type algoritme dat men van plan is te maken. Zie de kaders **JP1 – DSP-kloksignaal** en **JP2 – DSP-selfboot of niet** voor meer informatie. Raadpleeg ook het eerste deel van deze serie [1].

Mini-tutorial

Merk op dat aangezien we geen board gebruiken dat officieel ondersteund wordt door SigmaStudio, we op een bepaald moment tijdens het maken van het schema hieronder een melding zien over USB-problemen. Deze melding kunt u met een gerust hart negeren.

- Start SigmaStudio.
- Selecteer *File* → *New Project* en wacht tot het project is aangemaakt. U ziet een lijst met elementen in de toolbox aan de linkerkant. Selecteer het *ADAU1701*-blok, sleep het naar het *Hardware Configuration*-venster en zet het daar ergens neer. Herhaal de procedure voor een *USBi*-blok en een *E2Prom*-blok.
- Verbind een van de blauwe punten van het *USBi*-blok met de groene punt van de *ADAU1701*. Verbind het andere blauwe



Figuur 4. Zo begint u met een programma voor de ADAU1701 met EEPROM in SigmaStudio.

USBi-punt met de groene punt van de E2Prom. Het resultaat moet er uitzien als in **figuur 4**.

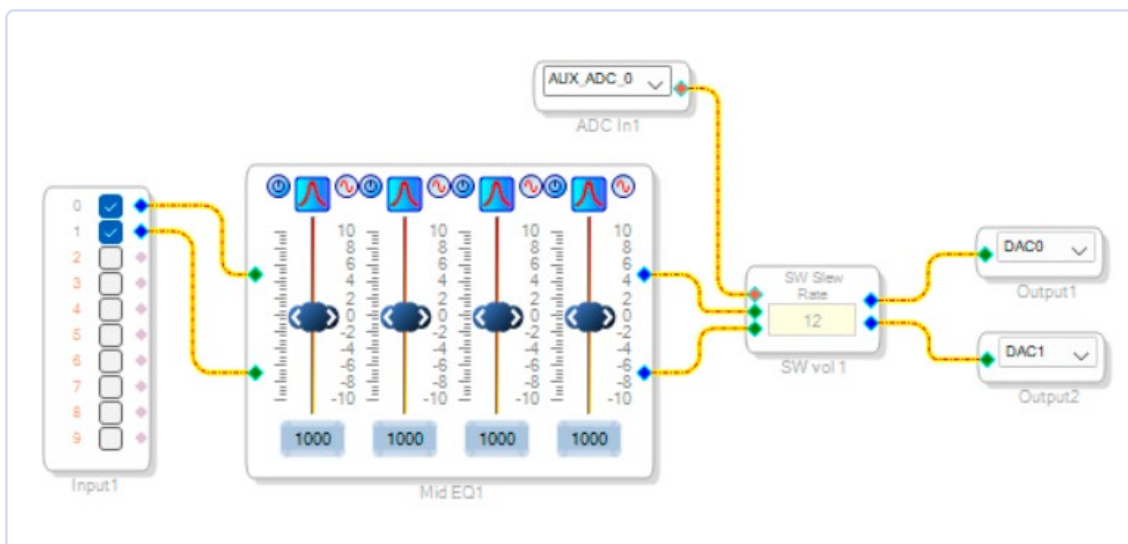
- > Sla het project op (bijvoorbeeld onder de naam *Mini Tutorial*) in een map met dezelfde naam.
- > Klik op de tab *Schematic*. Merk op dat de toolbox aan de linkerkant verandert.
- > Sleep vanuit *IO* → *Input* een *Input*-element naar het schema en zet het neer.
- > Sleep vanuit *IO* → *Output* een *Output*-element naar het schema en zet het neer. Herhaal deze stap om een tweede uitgang te plaatsen.
- > Sleep vanuit *IO* → *GPIO* → *Input* het element *Auxiliary ADC Input* naar het schema en zet het neer.
- > Sleep vanuit *Volume Controls* → *Adjustable Gain* → *Ext Control* → *Clickless SW Slew* de *Single slew ext vol* naar het schema en zet het neer.
- > Klik met de rechtermuisknop op het blok *SW vol 1* en selecteer

Grow Algorithm → 1. *Ext vol (SW slew)* → 1. Het blok heeft nu drie ingangen en twee uitgangen.

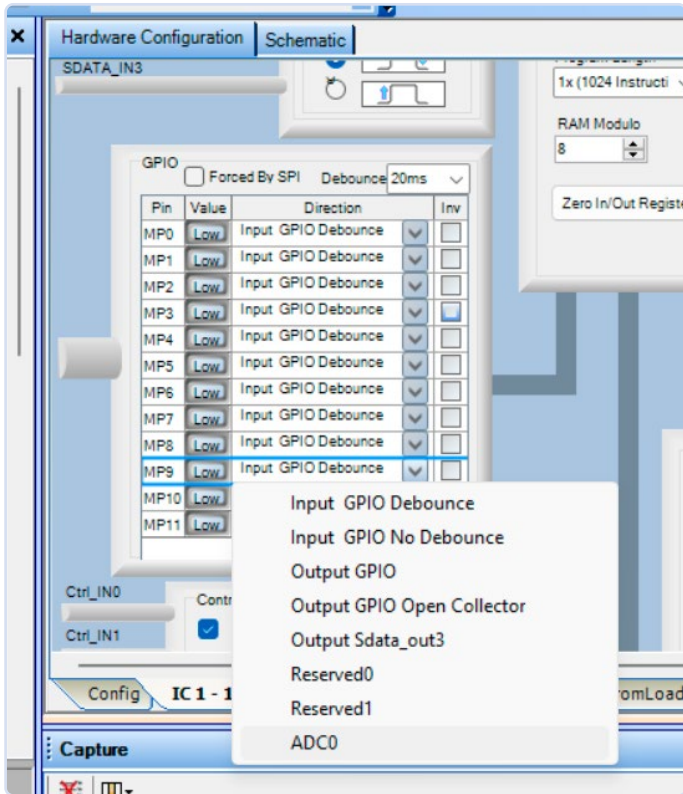
- > Sleep vanuit *Filters* → *Second order* → *Single precision* → 2 *Ch* de *Medium Size Eq.* naar het schema en plaats het. Klik met de rechtermuisknop op het blok *Mid EQ 1* en kies *Grow Algorithm* → 1. 2 *Channel - Single Precision* → 3. Het blok heeft nu vier schuifregelaars.
- > Sluit de blokken aan zoals in **figuur 5**.

Nu moeten we de DSP-pin MP9 (ADC0) configureren als een extra ADC-ingang:

- > Ga terug naar het tabblad *Hardware Configuration* en klik dan op de tab *IC1 - 170x140x Register Control* onderaan het venster.
- > Selecteer *MP9* in het *GPIO*-blok en verander *Input GPIO Debounce* in *ADC0* (zie **figuur 6**). Negeer eventuele verbodswaarschuwingen.



Figuur 5. Programmeren in SigmaStudio bestaat uit het neerzetten van blokken op een canvas en het tekenen van verbindingen ertussen.



Figuur 6. Configuratie van GPIO-pin MP9 van de DSP als analoge ingang.

- Ga terug naar *Schematic* en verander de waarden van de schuifregelaar-frequenties in de equalizer en stel de versterking naar wens in.
- Het project is klaar, sla het op.
- Druk op *F7* of selecteer in het menu *Action* → *Link Compile Download*. Negeer eventuele communicatiefouten.
- Ga terug naar het tabblad *Config* van het venster *Hardware Configuration*. Klik met de rechtermuisknop op *IC1* (de ADAU170, niet de EEPROM) en selecteer *Write Latest Compilation to E2PROM* (zie **figuur 7**) Hierdoor wordt een bestand *E2Prom.Hex* aangemaakt in de submap *my_project_IC2* (waarbij *my_project* de naam van het project is). Programmeer dit bestand in de EEPROM. Hoe? Daar komen we hieronder op terug. Maar eerst introduceren we een snellere methode om HEX-bestanden naar de DSP over te brengen, voor test- en ontwikkelingsdoeleinden.

SigmaStudio via WiFi

Een programma dat ontwikkeld is in SigmaStudio moet overgebracht worden naar de DSP op ons board. Als het programma klaar is, kan het het beste geëxporteerd worden als HEX-bestand. Men kan het ook toevoegen aan de E2PROM-collectie (*adau1701_e2prom_collection*) in de *Elektor_AudioDSP*-bibliotheek. Als de toepassing echter nog in ontwikkeling is, moet deze regelmatig worden geladen om te testen. Normaal gesproken wordt dit gedaan met een ontwikkelboard met een speciale USB-aansluiting, maar ons board ondersteunt deze methode niet. Gelukkig ondersteunt SigmaStudio ook het laden van DSP-uitvoerbestanden via een TCP/IP-verbinding, en dit ondersteunen we wel. Dit doen via WiFi is een eenvoudige taak voor de ESP32 en voegt over-the-air (OTA) mogelijkheden toe aan het systeem.

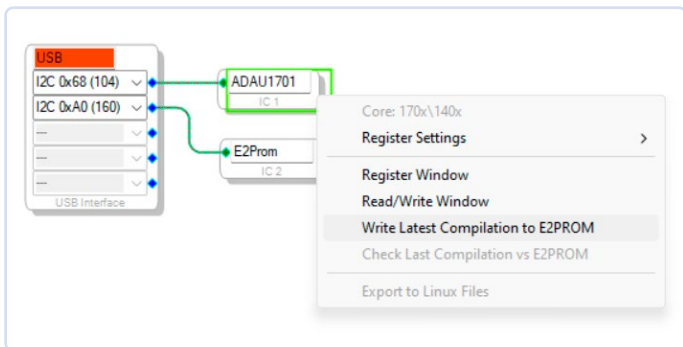
Het *sigmastudio_tcp_server* voorbeeld in de *Elektor_AudioDSP*-bibliotheek implementeert TCP/IP-communicatie met SigmaStudio. Laad de sketch naar de ESP32 op het Audio DSP FX Processor Board en open de Serial Monitor. Hier vindt u het IP-adres van het board.

In het SigmaStudio-project sluit men in plaats van een USBi-blok op de ADAU1701 nu een *TCPIP1701*-blok aan (**figuur 8**). Klik er met de rechtermuisknop op om het TCP/IP-configuratiepaneel (*Show TCPIP Settings*) te openen en voer het IP-adres van de Audio DSP FX Processor in. Klik op *Open Connection*. Als de seriële monitor een verbindingsbericht weergeeft, kunt u beginnen (**figuur 9**).

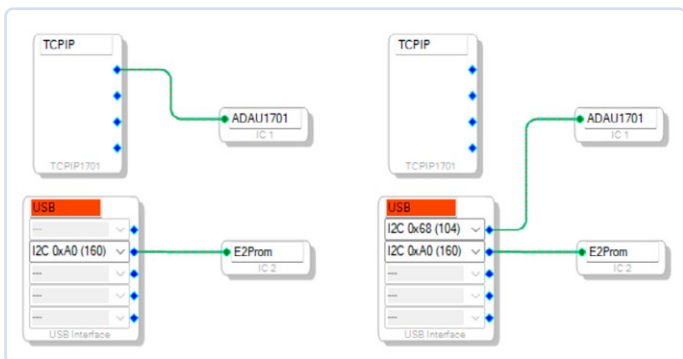
Teken het DSP-algoritme en wanneer het klaar is, klikt u op de knop *Link Compile Download* (of drukt u op *F7*). Het programma wordt nu naar het board gestuurd waar het onmiddellijk wordt uitgevoerd. De programmamethoden kunnen in real time worden aangepast. Dit is niet alleen een zeer snelle en handige manier van ontwikkelen, maar hiermee kan men het board in zijn testomgeving laten (wat niet op de werkbank naast de computer hoeft te zijn).

Helaas is het niet mogelijk om de EEPROM op deze manier te programmeren. Het genereren van een HEX-bestand voor de ADAU1701 in SigmaStudio 4.7 in TCP/IP-modus werkt niet en geeft een foutmelding. De enige manier om het te genereren is door een *USBi*-blok toe te voegen aan het canvas, de ADAU1701 erop aan te sluiten en dan het HEX-bestand op de gebruikelijke manier te genereren.

De *Elektor AudioDSP*-bibliotheek bevat een sketch *e2prom_writer_tcpip* waarmee de EEPROM via een (draadloos) netwerk kan worden geprogrammeerd. Samen met een terminalprogramma zoals Tera Term,



Figuur 7. Een rechter muisklik op het blok ADAU1701 geeft toegang tot de functie om een HEX-bestand te maken voor de EEPROM.



Figuur 8. Gebruik een *TCPIP1701*-blok (links) om verbinding te maken met een ADAU1701 via een (draadloze) netwerkverbinding. Dit blok kan naast een *USBi*-blok bestaan, waarmee een HEX-bestand kan worden aangemaakt na het opnieuw bedraden van de Hardware Configuration (rechts).

Meer resources

SigmaStudio

Er zijn heel wat projecten die de ADAU1701 gebruiken voor gitaareffectpedalen ('stomp boxes'), scheidingsfilters voor audio-/luidsprekersystemen en meer. Er zijn ook (Arduino-) bibliotheken voor het programmeren en besturen van de DSP. Een uitputtende lijst is natuurlijk ondoenlijk, maar een paar interessante bronnen zijn hier opgesomd. U kunt er meer vinden door bijvoorbeeld op GitHub te zoeken op trefwoorden als 'ADAU1701' en 'SigmaStudio'.

Aida DSP Arduino-Shield

Hoewel het Aida DSP Arduino Shield niet perfect compatibel is met het Elektor Audio DSP FX Processor Board, bevat de repository een goede verzameling SigmaStudio-projecten, variërend van eenvoudige voorbeelden tot virtuele microfoonvoorversterkers.

https://aidadsp.github.io/aida_dsp_arduino_shield.html

SigmaDSP

Gebaseerd op Aida DSP en wat reverse engineering, richt deze bibliotheek zich op het besturen van ADAU1701-algoritmen vanuit een microcontroller via I²C. Hij kan geïnstalleerd worden vanuit de bibliotheekmanager van de Arduino IDE en bevat verschillende voorbeelden. De documentatie bevat ook gedetailleerde instructies voor het converteren van systeembestanden geëxporteerd vanuit SigmaStudio naar iets bruikbaar in Arduino.

<https://github.com/MCUdude/SigmaDSP>

Espressif Audio Development Framework

Het officiële audio-ontwikkelingsframework voor de ESP32-familie. Deze bibliotheek richt zich op audio streaming van vele bestandsformaten van verschillende bronnen. Ondersteunde toepassingen zijn internetradio, Bluetooth-streaming, VoIP, MP3 en nog veel meer.

<https://github.com/espressif/esp-adf>

Dayton Audio

Dayton Audio, fabrikant van high-end audioversterkers, heeft ook een reeks versterkermodule gebaseerd op de ADAU1701 met Bluetooth. Deze modules worden geleverd met standaard-software, maar zijn programmeerbaar door de gebruiker. Het bedrijf heeft een mooie handleiding gemaakt voor SigmaStudio en levert het SigmaStudio-project plus voorbeelden. De bestanden zijn te vinden in bijvoorbeeld de downloadsectie van de KABD-4100 module.

<https://daytonaudio.com>

ESP32 & Arduino

Er bestaan veel bibliotheken voor het produceren en bewerken van audio met een ESP32. Hoewel verre van uitputtend, zijn hier een paar bronnen die u nuttig zou kunnen vinden.

Faust

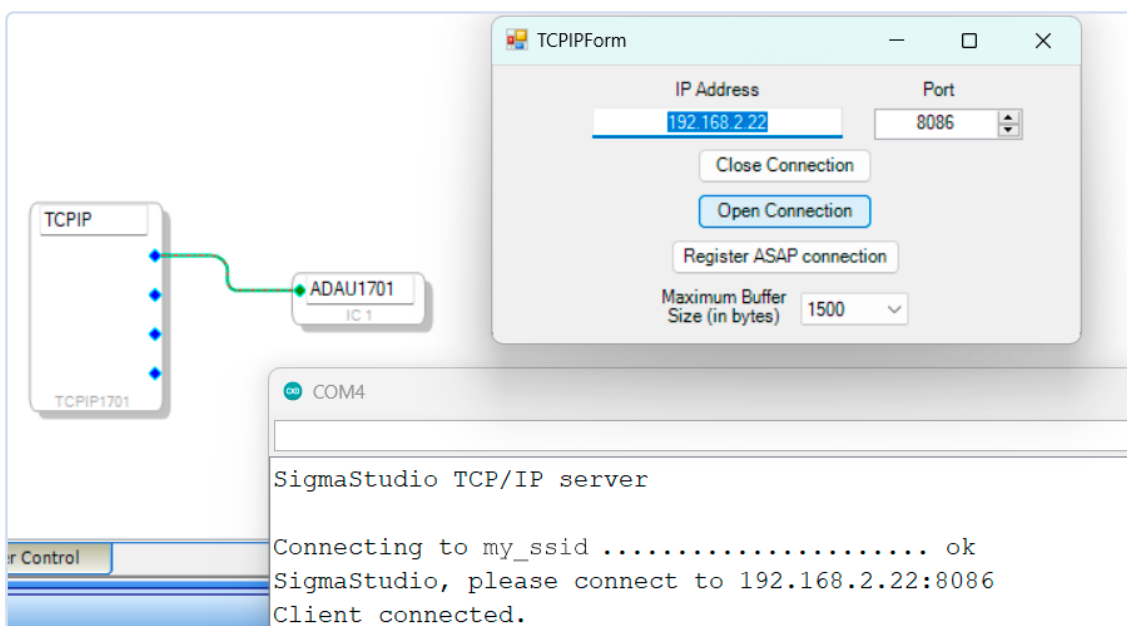
Faust, kort voor Functional Audio Stream, is een programmeertaal voor real time-signaalverwerking en synthese ontwikkeld door Grame, het Centre National de Creation Musicale in Villeurbanne bij Lyon in Frankrijk. Faust kan op veel platformen gebruikt worden, en de ESP32 is er daar een van. De code en gedetailleerde documentatie staan op GitHub.

<https://github.com/grame-cncm/faust>

Phil Schatzmann

De GitHub-space van Phil Schatzmann heeft verschillende repositories die interessant zijn voor de Audio DSP FX Processor. ESP32-A2DP is geweldig voor het maken van Bluetooth-audioapparaten. De Arduino Audio Tools-bibliotheek bevat audiobronnen en -sinks, filters, effecten, decoders en converters en nog veel meer. Sommige voorbeelden vereisen ook Phil's Arduino Audio Driver bibliotheek. Deze bibliotheken moeten worden gedownload van GitHub, omdat ze niet beschikbaar zijn in de bibliotheekmanager van de Arduino IDE.

<https://github.com/pschatzmann>



Figuur 9. Gebruik het *sigmastudio_tcp_server* voorbeeld (opgenomen in de *Elektor_AudioDSP-bibliotheek*) om een draadloze verbinding tussen SigmaStudio en de Audio DSP FX-processor tot stand te brengen.

dat bestanden zonder protocol over een netwerk kan versturen (raw mode, **figuur 10**), kunt u het gebruiken om E2Prom-bestanden direct in de EEPROM te laden (**figuur 11**). De manier waarop het werkt, is vrij eenvoudig: u stuurt het *.bin*-bestand in raw-modus en typt dan het commando *write* gevolgd door een druk op *Enter* om het programmeren te starten (zorg ervoor dat *newline* is gecodeerd als *CR+LF*-tekens, zie **figuur 12**).

Dit is het einde van de lange beschrijving van de Elektor Audio DSP FX Processor, van het ontwerp tot het gebruik. Nu is het aan u om er een leuke toepassing mee te maken. Raadpleeg het kader **Meer resources** voor inspiratie. En houd ons op de hoogte door een reactie achter te laten op [4]. ◀

vertaling: Willem den Hollander — 230510-B-03

Vragen of opmerkingen?

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

Over de auteur

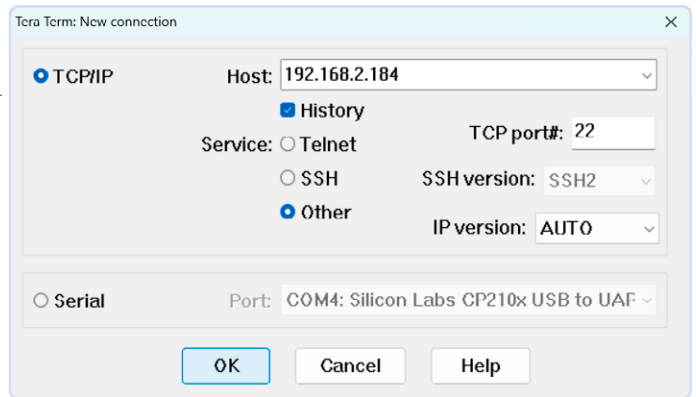
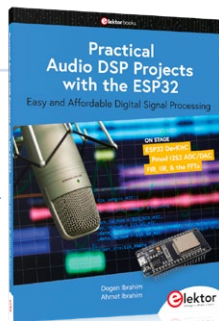
Clemens Valens begon in 2008 bij Elektor en heeft sindsdien verschillende functies bekleed. Momenteel maakt hij deel uit van het productontwikkelingsteam. Zijn voornaamste interesses in elektronica zijn (digitale) signaalverwerking en de toepassingen daarvan in muziekproductie en geluidssynthese.



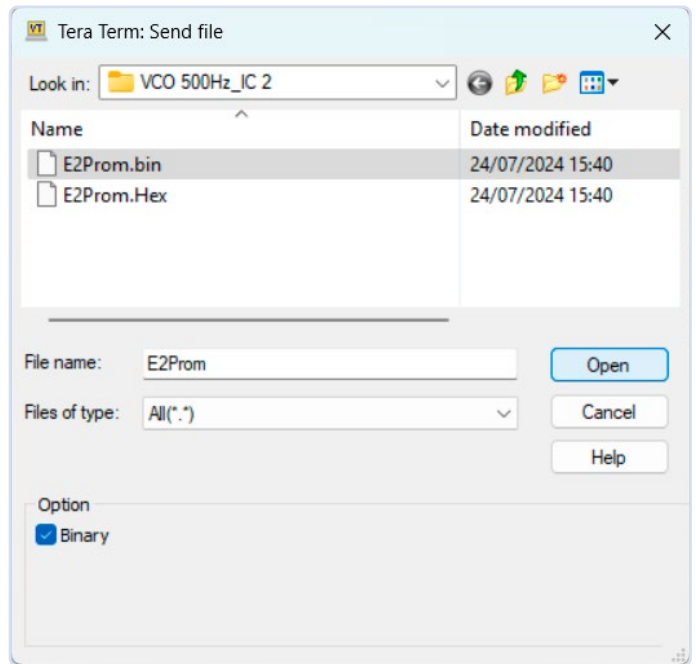
Gerelateerde producten

> **Elektor Audio DSP FX Processor**
www.elektor.nl/20895

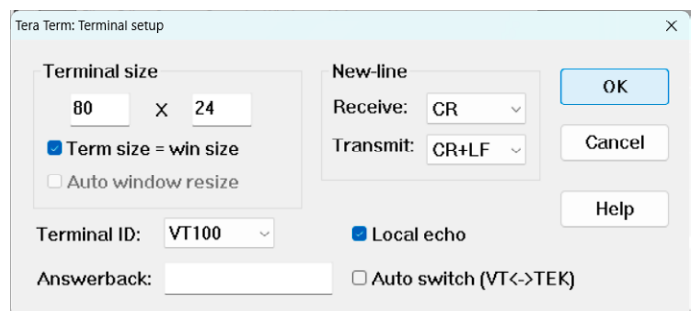
> **Dogan and Ahmet Ibrahim, *Practical Audio DSP Projects with the ESP32* (Elektor, 2023)**
www.elektor.nl/20558



Figuur 10. Kies in Tera Term de service 'Other' om bestanden via TCP/IP te verzenden zonder ingewikkelde protocollen te gebruiken.



Figuur 11. SigmaStudio maakt de executable in BIN- en in HEX-bestanden. Gebruik de optie 'Send File' van Tera Term om het binaire (.bin) bestand te verzenden, niet het HEX-bestand (.hex).



Figuur 12. Beëindig de EEPROM-programmeerprocedure op afstand door 'write' te verzenden (typ het in op het keyboard) gevolgd door <Enter>. Zorg ervoor dat de newline-terminator gedefinieerd is als CR+LF.

WEBLINKS

- [1] Clemens Valens, "Audio DSP FX Processor Board", Elektor november/december 2024: <https://www.elektormagazine.nl/magazine/elektor-360/63326>
- [2] ESP32 FAQ, How-to & Getting Started, elektor-labs.com: <https://elektormagazine.com/esp32-faq>
- [3] e Elektor_AudioDSP-bibliotheek op GitHub: https://github.com/ClemensAtElektor/Elektor_AudioDSP
- [4] De Audio DSP FX-processor op Elektor Labs: <https://elektormagazine.com/labs/audio-dsp-fx-processor>

Word lid van de Elektor Community



Neem nu een
lidmaatschap!



- ✓ Toegang tot het compleet web-archief t/m 1960!
- ✓ 8x Elektor Magazine (Print)
- ✓ 8x digitaal (PDF)
- ✓ 10% korting in de Elektor Store, en exclusieve aanbiedingen
- ✓ Toegang tot meer dan 5000 Gerberfiles



Ook verkrijgbaar

Het digitale
lidmaatschap!



- ✓ Toegang tot het compleet web-archief
- ✓ 10% korting in de Elektor Store
- ✓ 8x Elektor Magazine (PDF)
- ✓ Toegang tot meer dan 5000 Gerberfiles



www.elektormagazine.nl/abo

MAZZELAAR!



GRATIS
DOWNLOAD

Een e-zine abonnee mist nooit het maandelijkse 'reverse project'

Nog geen abonnee? Schrijf je in voor onze gratis e-zine op elektormagazine.nl/ezine-24

