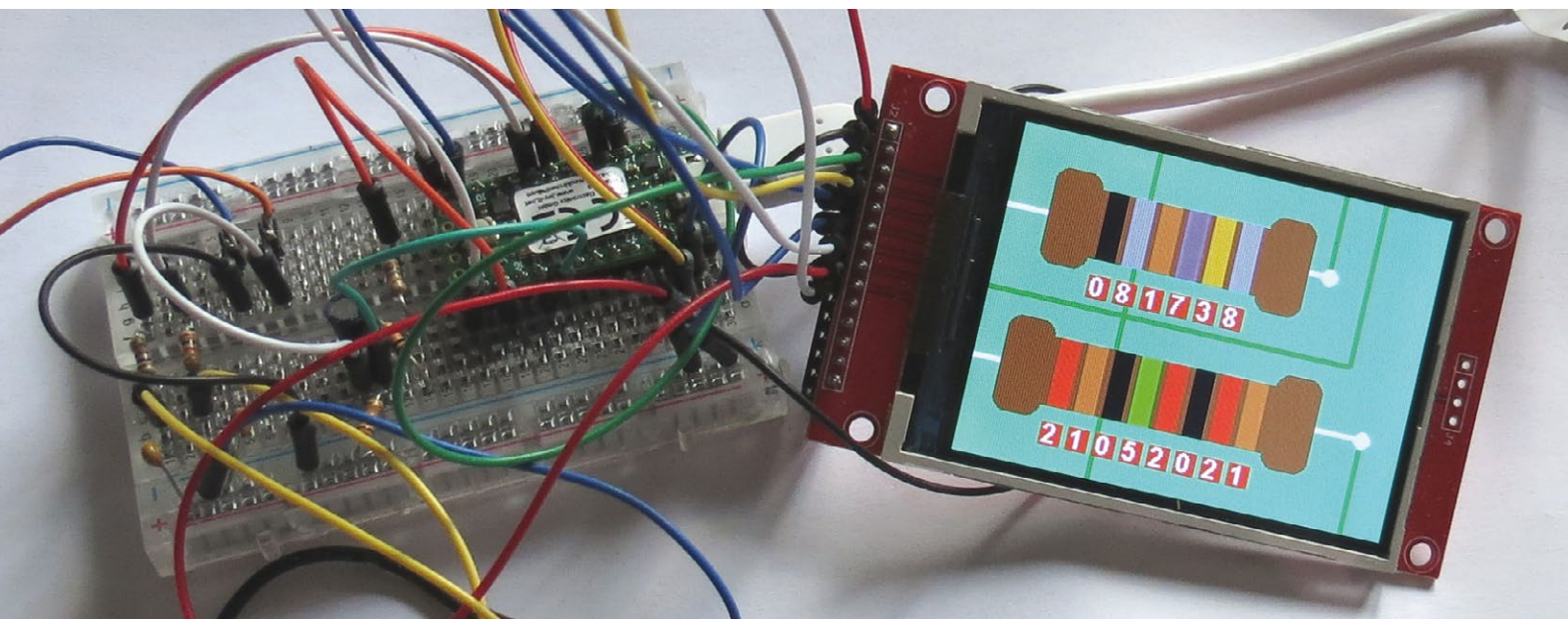




De SDR-radioklok bestaat uit het Teensy 4.0 microcontroller-board met aangesloten display, hier opgebouwd op breadboard. De tijd wordt hier weergegeven als weerstand-kleurcode.

SDR- radioklokken

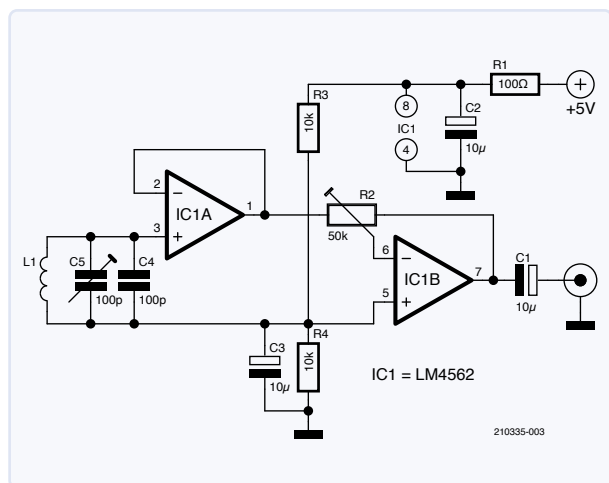
Prof. dr. Martin Ossmann

De huidige microcontrollers zijn zo krachtig dat ze gebruikt kunnen worden om radiogestuurde klokken te bouwen op basis van het software-defined radio (SDR) principe. Hoe dit in zijn werk gaat, is aangetoond door de MSF-radioklok [1], opgebouwd rond een Raspberry Pi Pico. Ook dit artikel gaat over tijdsignalen, maar dit keer wordt het snelle Teensy 4.0-board gebruikt als microcontroller.

Tabel 1. Voor deze zenders zijn ontvangers geïmplementeerd.

60,0 kHz	MSF	Britse tijdsignaalzender NPL
77,5 kHz	DCF77	Duits tijdsignaal
129,1 kHz	EFR	Radio-rimpelcontrole
162 kHz	TDF	Frans tijdsignaal
198 kHz	BBC	AM-uitzending met fasemodulatie

In dit project ontwikkelen we een ontvanger voor de signalen van de EFR-radio-dienst, die door energieleveranciers wordt gebruikt voor rimpelcontrole. EFR zendt ook met regelmatige tussenpozen tijdinformatie uit. Het bouwen van een radioklok ermee is iets nieuws. Hetzelfde op SDR gebaseerde concept kan met dezelfde hardware worden gebruikt om andere tijdsignalen te ontvangen, die wij van plan zijn uitgebreid te gebruiken (**tabel 1**). Een ander belangrijk doel van dit project is het tonen van de tijd op verschillende innovatieve displays.

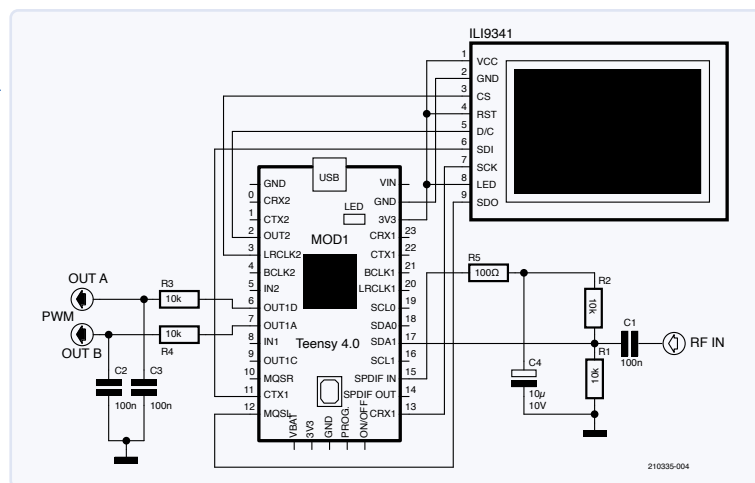


Figuur 1. Schema van de actieve antenne voor 129,1 kHz. De 250 windingen van 0,2 mm² geëmailleerd koperdraad zijn gewikkeld op een ETD29-spoelvorm. De spoel is op een ferrietstaaf van 150 × 8 mm geschoven, gemaakt van 3B1-materiaal. Door Cx aan te passen is de schakeling bruikbaar voor frequenties van 60 kHz tot 200 kHz.

Eén concept voor alle frequenties

Om de radiosignalen te ontvangen is allereerst een actieve antenne nodig, zoals in het schema van **figuur 1**. Het signaal van de ferrietantenne (150 mm × 8 mm, materiaal 3B1, spoelvorm ETD29, 250 windingen CuL 0,2 mm²) wordt gefilterd met een resonantiekring en vervolgens gebufferd door een opamp. De tweede trap is weer een opamp, waarvan de versterking met instelpot R2 aan de plaatselijke omstandigheden kan worden aangepast. Onze ontvanger werkt het beste wanneer een signaal van ongeveer 50 mV_{tt} op de uitgang van de tweetraps versterkerschakeling staat. De schakeling is geschikt voor alle hier gebruikte tijdsignaalfrequenties; wil je de antenne voor andere frequenties gebruiken, dan zul je condensator C4 moeten aanpassen.

Het volledige systeemschema is te zien in **figuur 2**. De belangrijkste component is een Teensy 4.0-board. Met weerstanden R1 en R2 stellen we de offset van de A/D-converter in, en met C1 koppelen we het signaal van de actieve antenne naar de A/D-converter van het Teensy-board. We hebben ons prototype op breadboard opgebouwd (zie nogmaals figuur 1). De twee laagdoorlaatfilters, R4/C2 en R3/C3, filteren de PWM-signalen van uitgangen 6 en 7. We gebruiken de PWM-signalen voor debugging, bijvoorbeeld om de I- en Q-signalen op een oscilloscoop weer te geven. Het display wordt aangesloten via de SPI-connector en enkele extra pinnen. De voeding gaat via de USB-poort, die ook wordt gebruikt om het board te programmeren en de debugging-teksten uit te voeren. Zo kun je de ontvangst van de gegevens bekijken in



Figuur 2. Schema van onze software-gedefinieerde radio voor radiogestuurde klokken.

de seriële monitor van de Arduino IDE. Het Teensy-board kan worden geprogrammeerd in de normale Arduino-ontwikkelomgeving.

Tijdcodes ontvangen

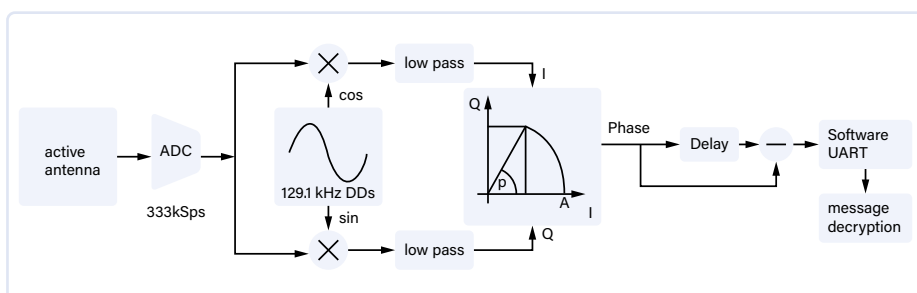
Het begrip 'universeel' heeft niet alleen betrekking op de hardware van de ontvanger, maar ook op de software. De structuur blijft gelijk voor alle hier genoemde tijdsignaalzenders. Maar omdat de demodulatie- en decoderings-routines zeer verschillend zijn, leek het mij zinvoller om voor elke tijdseinzender aparte firmware te schrijven dan alle routines in één firmware te stoppen en de gewenste te activeren via bijvoorbeeld een schakelaar. Het volledige, gedocumenteerde softwarepakket kan worden gedownload van de projectpagina bij dit artikel [2]. De basiswerking van de ontvanger zal echter eerst nader worden beschreven, met als voorbeeld de ontvangst van de EFR-langegolfzender op 129,1 kHz.

EFR-ontvangst

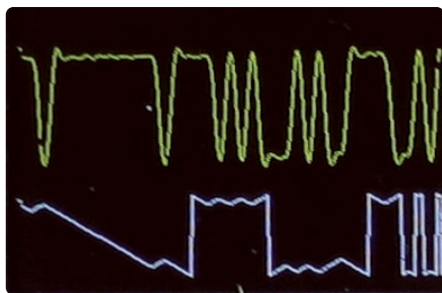
EFR GmbH exploiteert drie langegolfzenders (129,1 kHz, 139 kHz en 135,6 kHz) voor rimpelcontrole in energiecentrales [3]. De zenders

in Duitsland en Hongarije hebben elk een bereik van ten minste 500 km en bestrijken dus het grootste deel van Midden-Europa. Er wordt gebruik gemaakt van frequency-shift keying (FSK) met een afwijking van ±170 Hz en een datasnelheid van 200 bps. Naast de gecodeerde eigen berichten wordt ook tijdinformatie verzonden. Het protocol is gespecificeerd in IEC 60870-5.

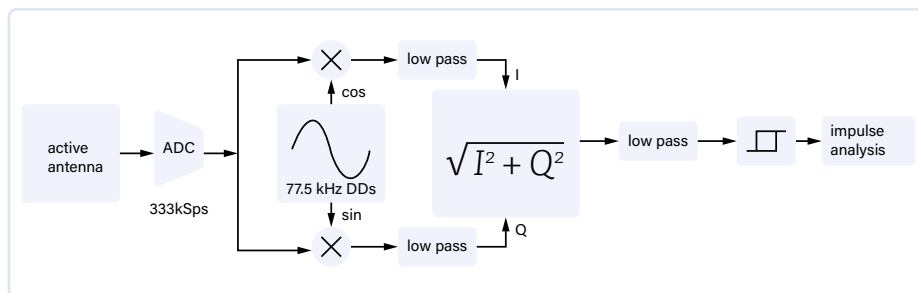
Het concept van onze EFR-ontvanger is geschetst in **figuur 3**. Het signaal van de actieve antenne bereikt de interne ADC van het Teensy 4.0-board, die geklokt is op 333,333 kHz. Er wordt dus voldaan aan het bemonsteringstheorema. Zoals gebruikelijk bij SDR-ontvangers wordt vervolgens een IQ-vermenigvuldiging uitgevoerd. Het oscillatorsignaal wordt gegenereerd met een in software geïmplementeerde DDS-generator. Na vermenigvuldiging van het ingangssignaal met het I- of Q-oscillatorsignaal wordt laagdoorlaatfiltering uitgevoerd. De laagdoorlaatfilters zijn zo gedimensioneerd dat het ontvangen signaal nog niet geclipt wordt, maar dat er ook geen andere signaalcomponenten doorgelaten kunnen worden.



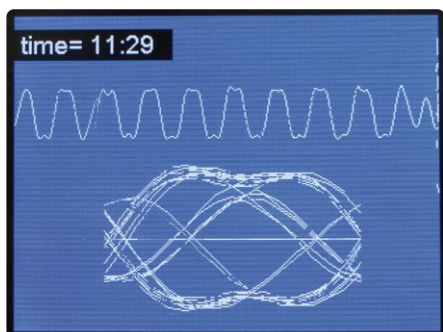
Figuur 3. De opzet van de EFR-ontvanger.



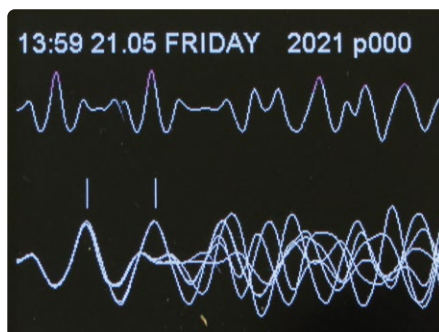
Figuur 4. Debug-informatie op het display. Bovenste grafiek: gedemoduleerd RTTY-sigitaal (momentane frequentie); onderste grafiek: momentane fase.



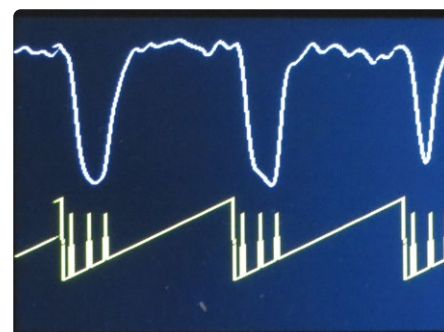
Figuur 5. Opzet van de DCF-ontvanger.



Figuur 6. Debug-informatie van de BBC-ontvanger. Boven: teruggewonnen datasigitaal; onder: oogdiagram.



Figuur 7. Debug-signalen van de TDF-ontvanger.



Figuur 8. MSF-debuginfo. Boven: ontvangsniveau met secundemarkers; onder: timervariabele met bemonsteringspunten.

Om het RTTY-sigitaal te demoduleren, moeten we de momenteel ontvangen frequentie bepalen. Bij +170 Hz offset is het een één, bij -170 Hz is het een nul. Daartoe bepalen we de huidige fase uit de I/Q-signalen. Dit doen we met de functie `atan2()`. Uit de faseverandering in de tijd kunnen we de frequentie bepalen. Daartoe berekenen we het verschil tussen het oorspronkelijke en het vertraagde sigitaal, wat resulteert in het gedemoduleerde sigitaal, dat we doorgeven aan een software-UART om de verzonden bytes terug te krijgen. Zo decoderen we de verzonden berichten, waaruit we dan weer de tijdinformatie kunnen halen. **Figuur 4** toont de debug-signalen op het display, boven het gedemoduleerde RTTY-sigitaal (momentane frequentie), en onder de momentane fase.

DCF-ontvangst

Het concept van de DCF-ontvanger (**figuur 5**) lijkt sterk op het EFR-concept. Ditmaal wordt echter de momentane zendamplitude bepaald aan de hand van de I/Q-signalen. Daartoe berekenen we $\sqrt{I^2 + Q^2}$.

Dit sigitaal wordt door een laagdoorlaatfilter gestuurd en naar een Schmitt-trigger geleid. Hierdoor komen de tweede pulsen beschikbaar voor evaluatie, en kunnen we uit de bits de datum en tijd bepalen.

BBC-ontvangst

De BBC zendt een radiosigitaal uit op 198 kHz. De draaggolf is fasegemoduleerd en wordt gebruikt voor gegevensoverdracht, vergelijkbaar met het RDS-systeem bij FM-radio [4]. De fasemodulatie wordt op dezelfde manier gedemoduleerd als in het EFR-systeem. De bitklok van 25 bps moet worden teruggewonnen uit het gedemoduleerde sigitaal (**figuur 6**). Daartoe vormt de ontvanger als het ware het oogdiagram en varieert de klok zodanig dat het oog zich maximaal opent. De gegevens worden dan bemonsterd in het midden van het oog. Van de aldus verkregen bitstroom moeten nu de blokgrenzen worden hersteld. De gegevens worden verzonden in blokken van elk 50 bits, waarvan 13 bits controlebits zijn. De ontvanger zoekt in de bitstroom naar foutloze blokken en herkent de blokgrenzen aan hun positie. Er zijn verschillende bloktypen die verschillende gegevens bevatten. Bloktype 0 is bedoeld voor de overdracht van de tijdinformatie en wordt door onze ontvanger gedecodeerd.

TDF-ontvangst

Tot 2016 zond TDF (voorheen *Télédiffusion de France*) een radioprogramma uit op 162 kHz, maar tegenwoordig wordt alleen de fasegemoduleerde draaggolf uitgezonden. In de gegevens is tijdinformatie opgenomen. Een

nul wordt verzonden als een enkele puls, een één als een dubbele puls, elk aan het begin van een seconde. **Figuur 7** toont de ontvangen fase-informatie (bovenste curve) en onderaan, als een soort oogdiagram, over elkaar liggende curven met de pulsen links tussen de verticale lijnen. In de 59^e seconde van elke minuut is het sigitaal niet fasegemoduleerd. Onze ontvanger gebruikt deze pauze voor synchronisatie. De structuur van de individuele bitinformatie is vergelijkbaar met die van DCF77.

MSF op 60 kHz

Op 60 kHz heeft het NPL (*National Physical Laboratory*) in Groot-Brittannië een langegolfzender die met 15 kW tijdinformatie uitzendt. Er wordt gebruik gemaakt van eenvoudige aan/uit-draaggolfmodulatie [5]. De minuut begint met een pauze van 500 ms. De volgende seconden beginnen elk met een draaggolf-onderbreking van 100 ms en vervolgens nog twee onderbrekingen van 100 ms indien nodig, afhankelijk van de te versturen bits. Onze MSF-ontvanger is opgebouwd zoals de DCF-ontvanger, alleen de pulsdecoding gebeurt anders. Vergeleken met de andere signalen is het MSF-sigitaal relatief zwak, maar toch heel behoorlijk te ontvangen aan de westelijke grens van Duitsland (**figuur 8**).

Display-opties

Toen de auteur besloot om een op EFR gebaseerde radioklok te bouwen, moest hij ook beslissen welk display moest worden gebruikt. Hij koos voor een 2,8"-LCD met 320 x 240 pixels. Het display is gebaseerd op een ILI9341-controller en is bijvoorbeeld via eBay verkrijgbaar. Als alternatief kan het kleine broertje van het display met een diagonaal van 2,2" maar dezelfde resolutie uit de Elektor-shop worden gebruikt (zie **Gerelateerde producten**). Het display wordt op het Teensy-board aangesloten via de SPI-interface.

Weerstand-display

Onze EFR Klok biedt een enigszins ongebruikelijke nieuwe weergaveoptie, het 'weerstand-display' (figuur 9). De cijfers van tijd en datum worden kleur gecodeerd weergegeven zoals gebruikelijk bij weerstanden. Er zijn twee weerstanden in het display, één met zes ringen voor de zes cijfers van de tijd (uren:minuten:seconden, bijvoorbeeld 12:23:45). De tweede weerstand heeft acht ringen voor de datum (dag.maand.jaar, bijvoorbeeld 23.08.2012). De tijd wordt elke seconde bijgewerkt, en de lokale klok wordt

altijd gesynchroniseerd wanneer de tijdgegevens van de EFR-dienst worden ontvangen. Voor gebruikers die de weerstandscodes nog niet kennen, worden de tijd en datum ook normaal numeriek weergegeven. De puristen onder de lezers wijzen er misschien op dat weerstanden maximaal zes ringen hebben, maar zo kunnen beginners tenminste op een leuke manier de DIN41429-kleurcode leren.

Domino-display

Een ander grappig display-idee is een domino-display geïmplementeerd (figuur 10). Met dominostenen kun je de cijfers 0...9 weergeven. Elke domino biedt ruimte voor twee cijfers, dus je hebt drie domino's nodig voor de tijd en vier voor de datum. Of het weerstand-display, het domino-display of een andere optie wordt gebruikt, wordt in de broncode bepaald met behulp van optiebits (listing 1). De gewenste optie wordt geselecteerd met een "1", de andere opties worden uitgeschakeld met een "0".

Woordklok en analog display

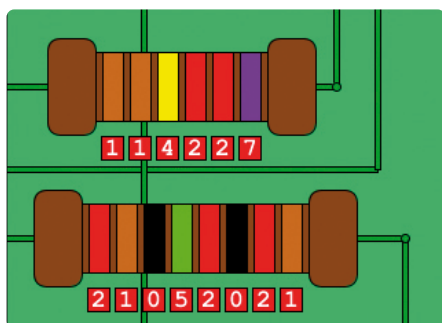
Naast de tot nu toe beschreven weergaven kun je ook kiezen voor een woord-display,

waarbij de tijd als platte tekst (Duitstalig) op het display wordt weergegeven (figuur 11). Bij deze optie wordt alleen de tijd weergegeven, niet de datum. De tijd wordt elke vijf minuten bijgewerkt. Het klassieke displayformaat van een analoge klok is ook geïmplementeerd (figuur 12). De tijd wordt weergegeven op een ronde wijzerplaat, en de datum als tekst eronder.

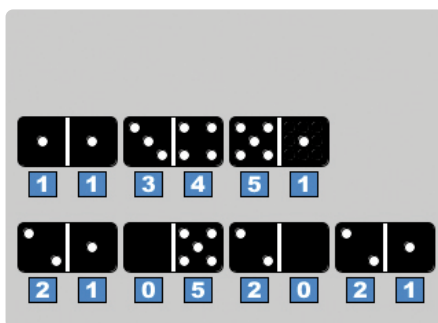


Listing 1. Het display wordt geselecteerd via deze constanten.

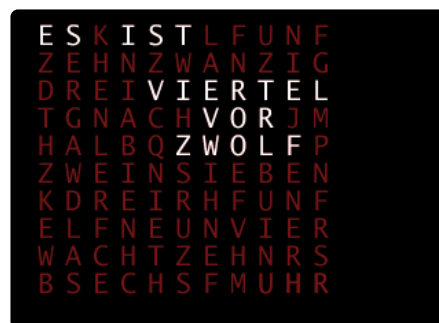
```
#define scopeShow      0
#define scopeClkShow  1
#define resShow        0
#define dominoShow    0
#define wordShow       0
#define sevenSegShow   0
#define AP6571Show     0
```



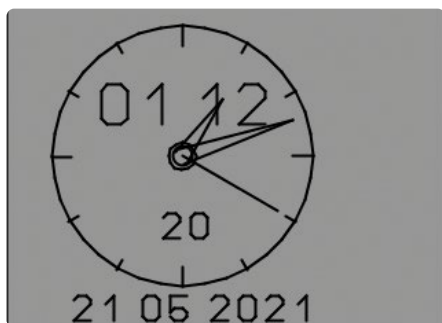
Figuur 9. Weergave als weerstand-kleurcode.



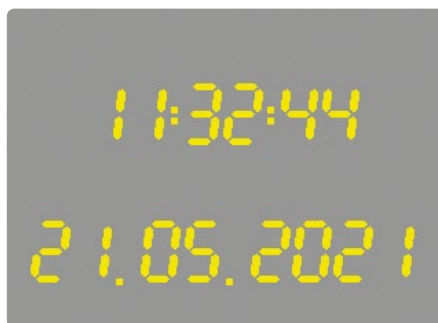
Figuur 10. Domino-display.



Figuur 11. Er is ook een tekstuele klok geïmplementeerd.



Figuur 12. Klassieke analoge klok.



Figuur 13. Nostalgisch zeven-segment display.



Figuur 14. Weergave als bij een dotmatrix-printer.

Zeven-segment-display

Natuurlijk hebben we ook een eenvoudig, nostalgisch zeven-segment-display in de aanbieding. Dus als je aan vroeger dagen wilt worden herinnerd, is dit de juiste keuze (figuur 13).

Dotmatrix-display

Als laatste optie bieden wij een eenvoudige tekstweergave op basis van de legendarische 6571AP ROM-karaktergenerator, ooit veel gebruikt in 9-pins dotmatrix-printers (figuur 14).

Over het geheel genomen biedt dit project veel combinatiemogelijkheden en opties. Je kunt kiezen tussen vijf radioklokvarianten van

EFR tot DCF en tussen zes display-opties, dus er moet echt voor elk wat wils tussen zitten. Als je wilt, kun je de software, bijvoorbeeld de display-opties, ook gebruiken als uitgangspunt voor eigen ontwikkelingen. ◀

210335-03

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.



Gerelateerde producten

- > **Teensy 4.1 Development Board (SKU 19311)**
www.elektor.nl/teensy-4-1-development-board
- > **2.2" SPI TFT display module ILI9341 (240x320) (SKU 18419)**
www.elektor.nl/2-2-spi-tft-display-module-ili9341-240x320

WEB LINKS

- [1] Martin Ossmann, "Een MSF-SDR met de Raspberry Pi Pico", Elektor juli/augustus 2022: <https://www.elektormagazine.nl/magazine/elektor-266/60631>
- [2] Firmware op de projectpagina: <https://elektormagazine.nl/210335-03>
- [3] EFR-signaal: https://mee.hu/files/images/5/B_Sbick_EFR-CEE_Lakihegy.pdf
- [4] L.F. Radio Data specification: <https://downloads.bbc.co.uk/rd/pubs/reports/1984-19.pdf>
- [5] MSF 60 kHz tijd- en datumcode: https://www.npl.co.uk/products-services/time-frequency/msf-radio-time-signal/msf_time_date_code

elektor e-zine

Your dose of electronics



Elke week dat u zich niet inschrijft voor onze nieuwsbrief mist u leuke elektronica-gerelateerde artikelen en projecten!

Dus, waarom nog langer wachten? Abonneer u vandaag nog op www.elektor.nl/ezine en ontvang bovendien een gratis Raspberry Pi projectboek!

