

Hoogspanningsvoeding met karakteristiekenschrijver

spanningen tot 400 V instellen en karakteristieken van buizen en transistoren meten

Rainer Schuster (Duitsland)

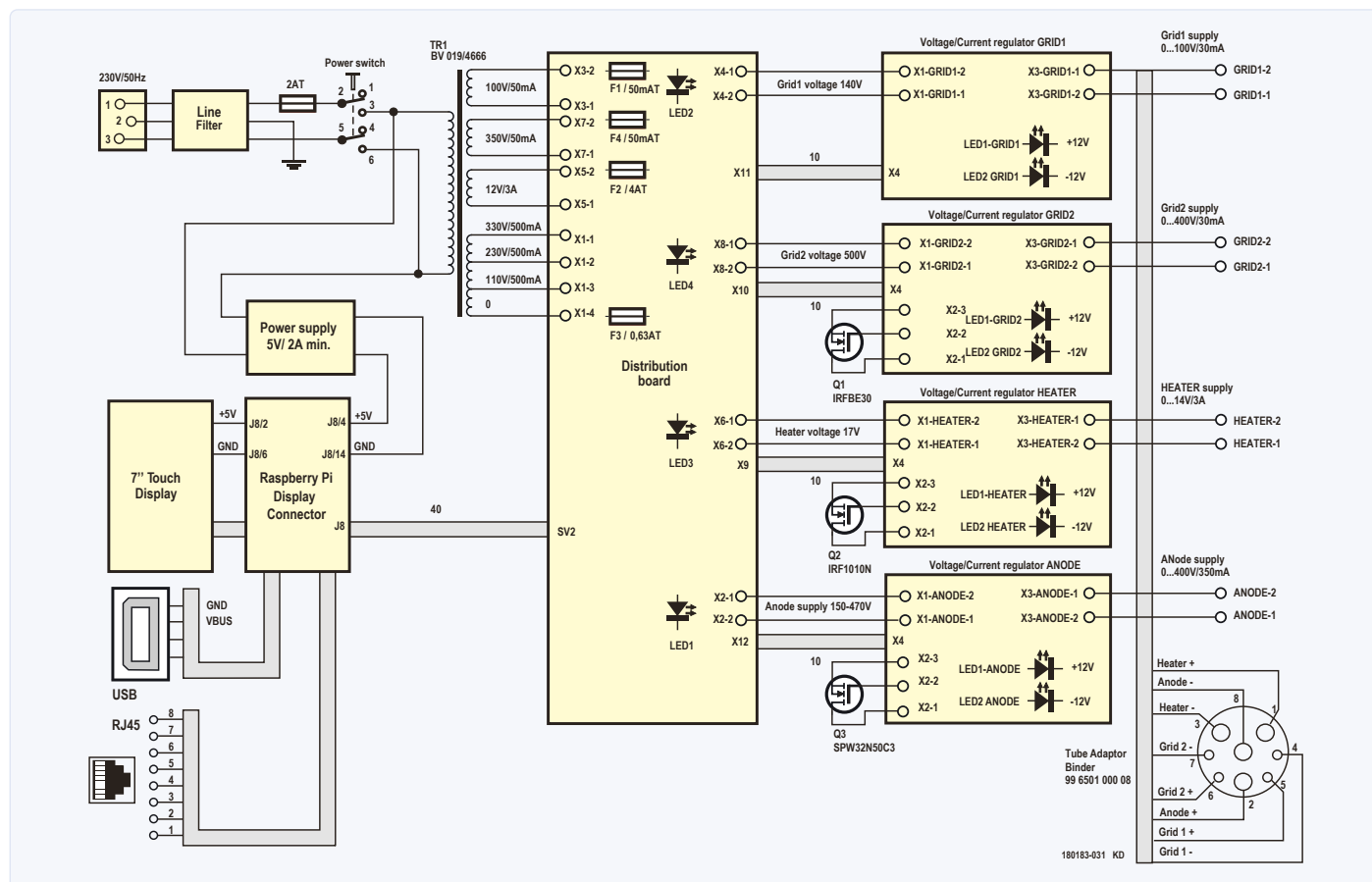
Deze universele hoogspanningsvoeding levert niet alleen de voedingsspanningen voor buizenschakelingen, maar kan ook worden gebruikt om de karakteristieken van buizen en halfgeleiders te meten. Hij wordt bestuurd door een Raspberry Pi met een 7"-aanraakscherm.

Elke elektronicus heeft wel een labvoeding, want in de lijst van onmisbare gereedschappen staat die op de derde plaats, meteen na de soldeerbout en de multimeter. Meestal gaat het om een 'laagspanningsvoeding' voor

minder dan 60 V bij een stroom van een paar ampère. Dat is genoeg voor het leeuwendeel van de schakelingen die we in het elektronica-lab willen voeden. Maar er komen in de wereld van de elektronica ook andere beesten voor

dan leeuwen. Soms zijn veel hogere spanningen nodig, zeker als het gaat om schakelingen met buizen.

Als we toch al een speciale voeding voor hoge spanningen willen ontwerpen, dan kunnen



Figuur 1. Het blokschema van de hoogspanningsvoeding toont de samenhang tussen de afzonderlijke onderdelen.

we met behulp van wat moderne technologie meteen een aantal interessante extra functies toevoegen. Met moderne technologie bedoe- len we hier de intelligentie van een RPi. Aan het rekenvermogen worden geen hoge eisen gesteld, dus het hoeft niet per se de nieuwste versie 4 te zijn, zelfs een RPi 3 of 2 is krach- tig genoeg. Dankzij een 7"-touchscreen zijn de bediening en het display ook up-to-date. Nuttige extra functies zoals een karakteris- tiekenschrijver voor buizen en halfgeleiders kunnen met software eenvoudig worden geïmplementeerd.

Netvoeding: de hardware

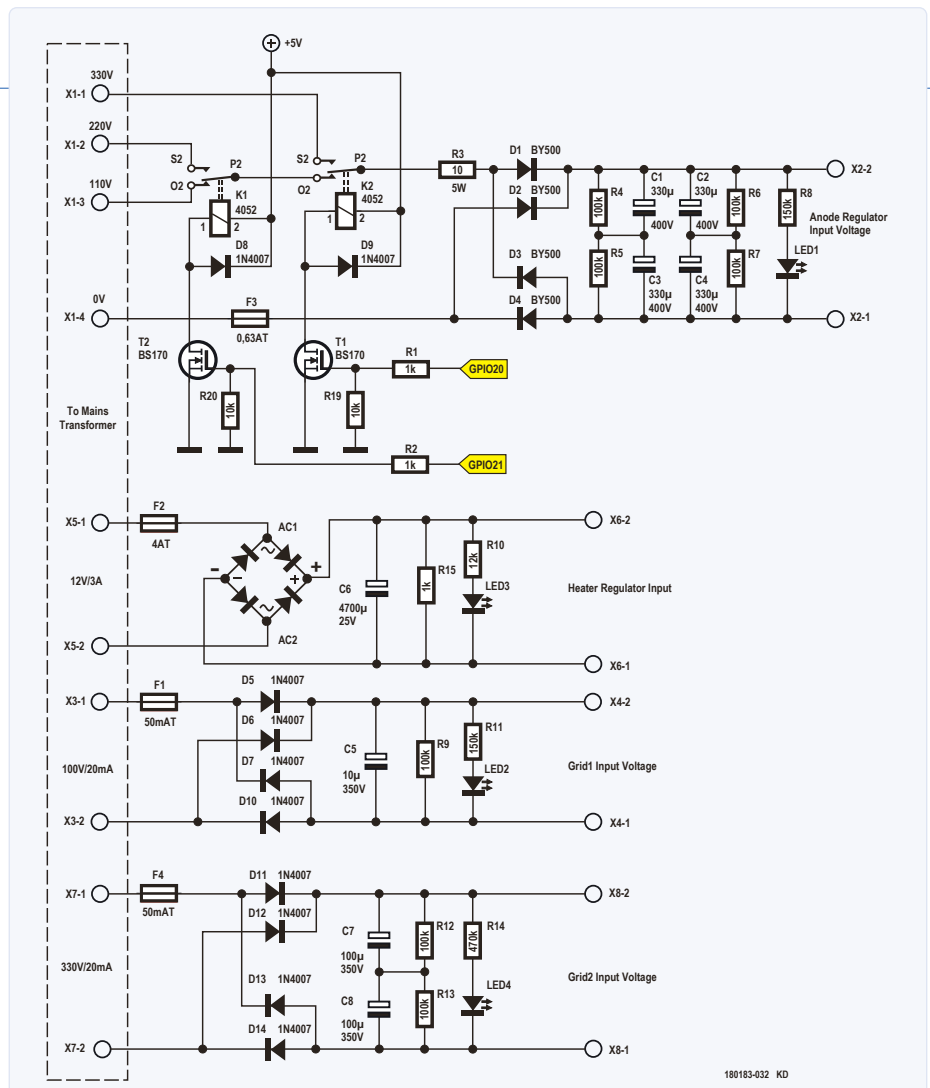
Natuurlijk levert het voedingsgedeelte meer dan één 'hoogspanning'. Per definitie gaat het eigenlijk niet om hoogspanning, want we komen lang niet aan de 1,5 kV_{DC}. Als u buizen wilt voeden, hebt u naast de anodespanning ook een spanning voor de gloeidraden nodig. En als we karakteristieken willen meten, dan zijn er ook nog spanningen nodig voor de stuur- en schermroosters. En al die spanningen en stromen moeten instelbaar zijn. De hardware voor het regelen van spanning en stroom voor de verschillende sub-eenhe- den bestaat uit vier onafhankelijke en galva- nisch gescheiden eenheden die de volgende spanningen en stromen kunnen leveren:

- > anode: 0...400 V; 0...300 mA
- > stuurrooster: 0...100 V; 0...30 mA
- > schermrooster: 0...400 V; 0...30 mA
- > gloeispanning: 0...14 V; 0...3 A

In **figuur 1** ziet u een blokschema van de netvoeding en de bekabeling tussen de verschillende onderdelen. De diverse functies van de netvoeding zijn op het distributieprint en de onafhankelijke subvoedingen (regel- printen) ondergebracht.

Distributieprint

Op de distributieprint bevinden zich de gelijk- richters, afvlakelco's en zekeringen voor de verschillende regelprinten. De I/O-lijnen van de Raspberry Pi zijn verbonden met de 40-pens connector SV2. De SPI-signalen worden via X9...X12 doorverbonden met de regelprinten. Bij de anodespanning wordt afhankelijk van de uitgangsspanning met de relais K1 en K2 overgeschakeld op transformatorwikkelingen voor 110, 220 of 330 V om het vermogens- verlies in de serietransistor te beperken. De omschakeling wordt via de GPIO-pennen 20 en 21 gestuurd door de software in de RPi. **Figuur 2** toont het volledige schema van de distributieprint.



Figuur 2. Het schema van de distributieprint.

Regelprinten

Elke regelprint bevat A/D- en D/A-omzetters (voor het instellen en meten van spanning en stroom) die via de SPI-interface met de RPi communiceren. De SPI-signalen zijn ook galvanisch gescheiden van de RPi.

De werking

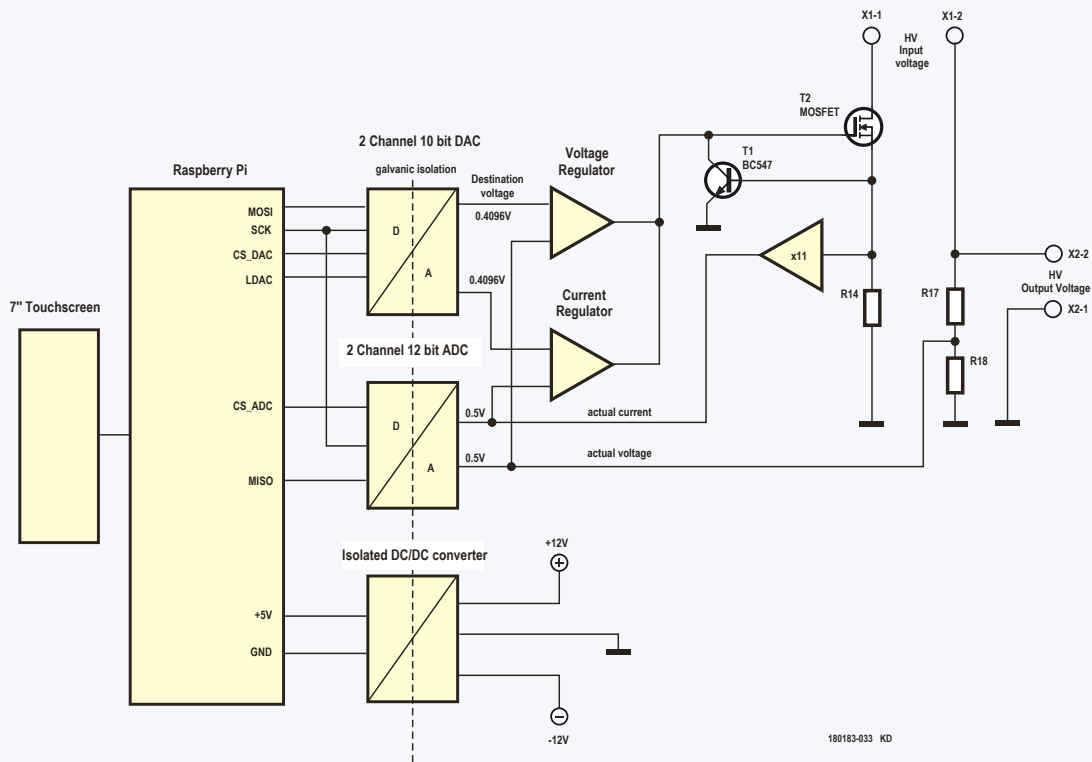
In **figuur 3** ziet u het prinsipeschema. MOSFET T2, aangesloten als serieregelaar, zorgt voor de spanningsregeling. Om T2 met normale opamps te kunnen aansturen bij de hier gebruikte hoge spanningen is de positieve pool van de uitgangsspanning verbonden met de massa (GND) van de opamp-voeding, die een symmetrische spanning van ± 12 V levert. Voor het instellen van gewenste waarden voor stroom en spanning wordt een 2-kanaals DAC van het type MCP4812 met een resolutie van 10 bit gebruikt. Deze DAC heeft een interne referentiespanning van 2,048 V, die met een SPI-commando kan worden verdubbeld naar 4,096 V. De uitgangsspanning wordt

gedeeld met R17/R18 en de spanning over R18 wordt gedigitaliseerd door de LTC1298 12-bit A/D-converter en als werkelijke waarde naar de RPi gestuurd.

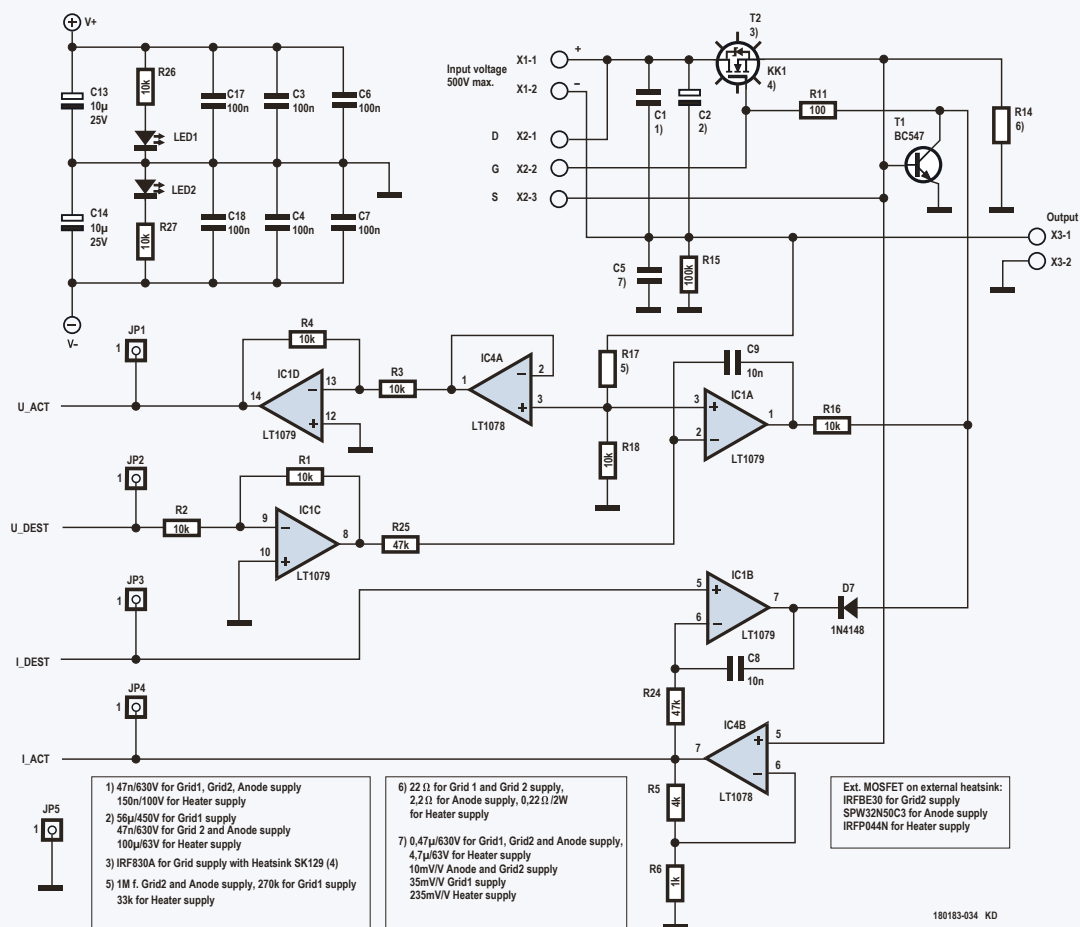
Voor de stroomregeling wordt de spanningsval over R1 verviervoudigd door een opamp. De spanning van deze opamp wordt dan via het tweede kanaal van de A/D-converter naar de RPi gevoerd als werkelijke stroomwaarde. De galvanische scheiding van de SPI-signalen MOSI, MISO, SCLK en LDAC en de chipselect-lijnen voor de A/D- en D/A-omzetter werkt met snelle optocouplers van het type 6N137, die worden aangestuurd via een 74HC04.

Alle regelprinten hebben ook een galvanisch gescheiden voeding nodig. Daarom is op de 5V-uitgang van het RPi pro-board voor elke print een TMA0512D DC/DC-converter aangesloten, die de benodigde ± 12 V voor de opamps genereert.

De werkelijke waarden van spanning en stroom gaan niet alleen naar de ingangen van de A/D-omzetter, maar dienen ook als



Figuur 3. Principeschema van de hoogspanningsvoeding.



Figuur 4a. Schema van de eigenlijke besturing van de regelprint.

terugkoppeling voor de twee opamps voor de spannings- en stroomregeling. Deze opamps vergelijken de werkelijke waarden met de ingestelde waarden van de D/A-omzetters. Zo ontstaat een correctiesignaal voor de spanningsregelaar dat naar de gate van T2 gaat. De stroomregeling grijpt in als de gemeten stroom hoger is dan de ingestelde stroom. Het gaat dus om een constante-spanningsregeling met instelbare stroombegrenzing.

Door het integrerende gedrag van de regelaars zal bij een 'harde' kortsluiting aan de uitgang de stroom kortstondig de gewenste waarde overschrijden. Daarbij kan T2 op de anodespanning-print buiten zijn veilige werkgebied (Safe Operating Area, SOA) komen. Om dat te voorkomen begrenst T1 de uitgangsstroom snel en radicaal tot maximaal $0,7 \text{ V} / R_{14} = 0,31 \text{ A}$. De vermogensdissipatie bedraagt dan kortstondig $465 \text{ V} * 0,31 \text{ A} = 144 \text{ W}$, totdat de ingangsspanning door de software naar 110 V wordt geschaald. Volgens de datasheet kan T2 bijna twee

keer dit verliesvermogen verdragen.

Figuur 4 toont het concrete schema van de regelprinten. We hebben het regelgedrag van deze schakeling gesimuleerd met LTSpice. Voor geïnteresseerden hebben we het bestand *HVRegulator.asc* toegevoegd aan

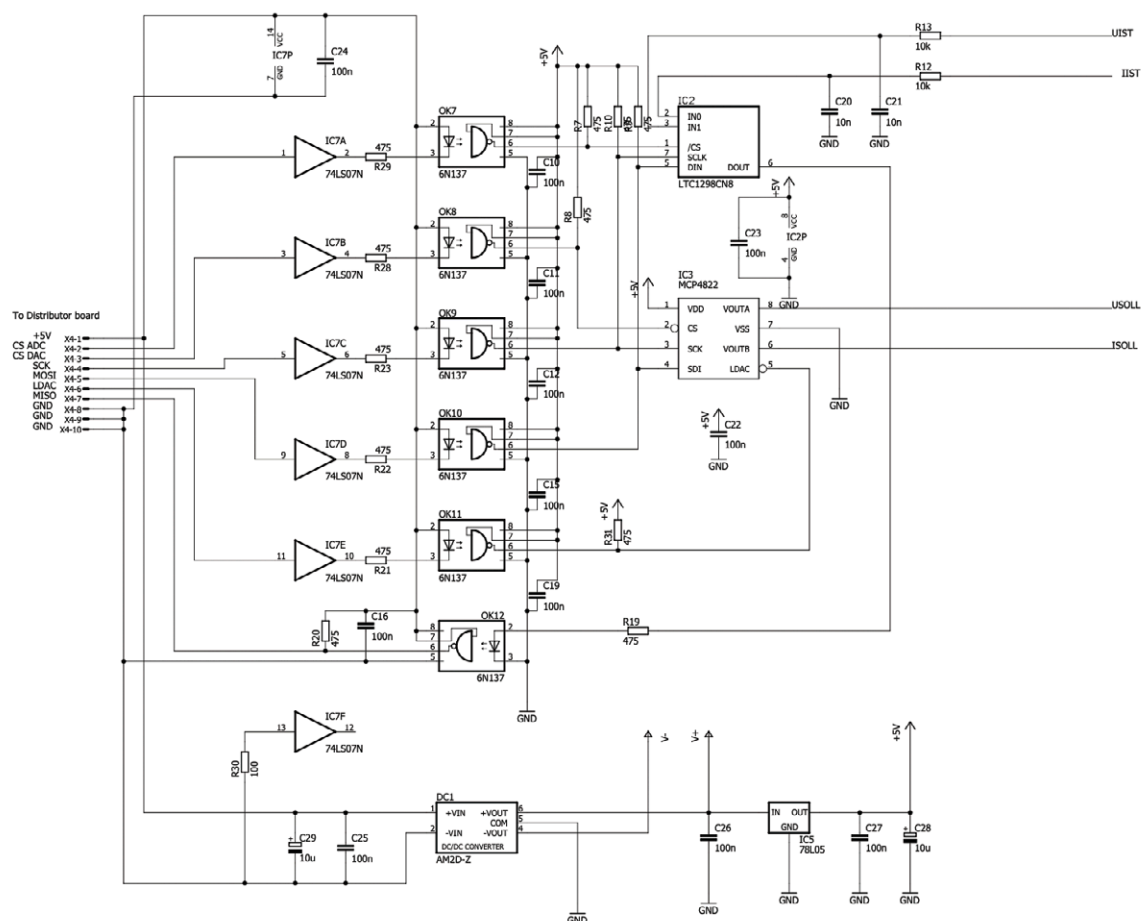
het gratis van de projectpagina bij dit artikel te downloaden archief [1]. Alle regelprinten hebben dezelfde layout, maar ze zijn vanwege de verschillende spanningen en stromen met verschillende onderdelenwaarden bestukt (zie **tabel 1**).

Tabel 1.

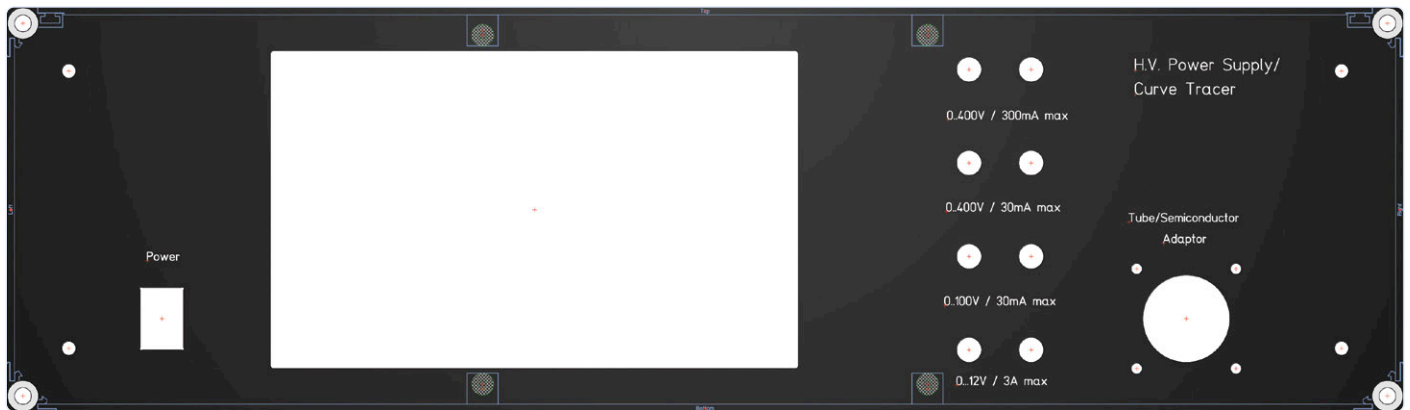
Print	C1	C2	C5	T2	R14*	R17**
Anode	47 nF 630 V	47 nF 630 V	0,47 uF 630 V	SPW32N50C3 (KK $\leq 0,7 \text{ k/W}$)	2,2 Ω 1 W	1 M Ω
Stuurrooster	47 nF 630 V	56 uF 450 V	47 nF 630 V	IRF830A (KK SK129)	22 Ω	270 k
Schermrooster	47 nF 630 V	47 nF 630 V	47 nF 630 V	IRFBE30 (KK $\leq 0,7 \text{ k/W}$)	22 Ω	1 M
Gloeispanning	150 nF 100 V	100 nF 63 V	4,7 uF 63 V	IRFP044 (KK $\leq 0,7 \text{ k/W}$)	0,22 Ω 2 W	33 k

* $R_{14} = 4,096 \text{ V} / (5 * I_{\text{max}})$

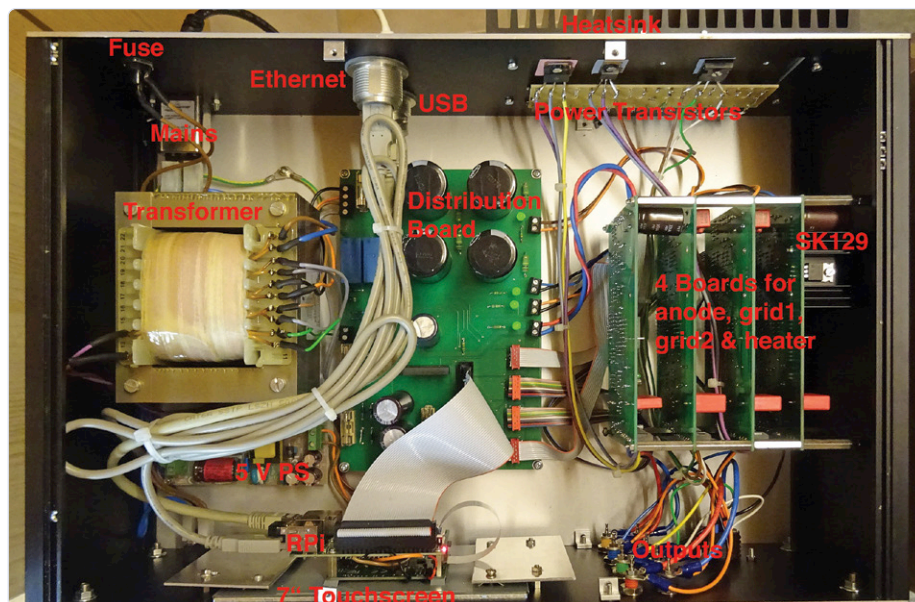
** $R_{17} = U_{\text{max}} * 2,441 \text{ k}\Omega / \text{V} - 10 \text{ k}\Omega$



Figuur 4b. Aansluiting van de regelprint op de distributieprint.



Figuur 5. Het met FrontDesign getekende frontpaneel.



Figuur 6. Het prototype van binnen.

Raspberry Pi

Zoals al opgemerkt, gebruiken we voor de besturing een Raspberry Pi met een 7"-aanraakscherm. Voor de voeding van de RPi is elke kleine open-frame schakelende voeding geschikt die 5 V bij 2 A kan leveren (3 A voor de RPi 4). De uitgangsspanning van deze voeding moet rechtstreeks op connector J8 worden aangesloten, omdat de spanningsval over de micro-USB-connector te groot is.

Opbouw

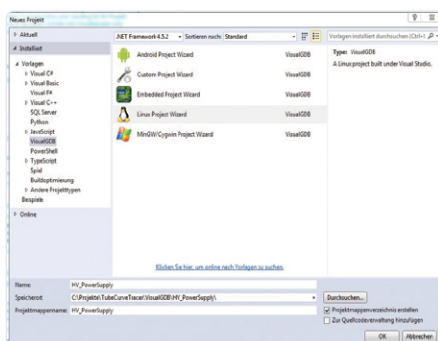
Het apparaat is ingebouwd in een profielbehuizing die is ontworpen met het programma FrontDesign, dat voor Windows, MacOS en Linux gratis verkrijgbaar is bij Schäffer [2]. **Figuur 5** toont het ontwerp van de frontplaat. De bijbehorende bestanden zijn ook te vinden in de Elektor-download [1]. In **figuur 6** ziet u het bovenaanzicht van ons prototype. De vier identieke regelprinten aan de rechterkant zijn duidelijk zichtbaar.

Software

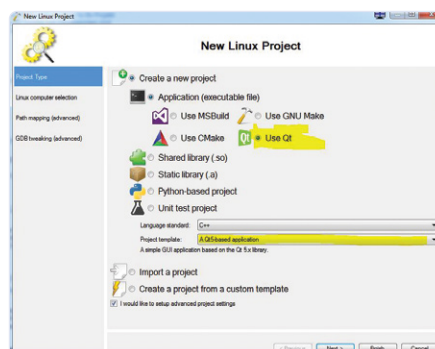
De software voor de RPi is gemaakt in C++ voor Visual Studio van Microsoft [3]. Om de code ook op de RPi te laten draaien is de cross-compiler VisualGDB [4] nodig, waarvoor een 30-dagen testversie beschikbaar is. Voor het maken van de grafische interface is Qt Designer [5] gebruikt.

Het projectbestand *HV_PowerSupply.sln* dat in de Elektor-download [1] is opgenomen, bevat de noodzakelijke instellingen voor VisualGDB (**figuur 7**). Hier moet worden ingesteld dat het een Linux-project is. Ook moeten de projectnaam en -directory worden opgegeven.

Daarna moeten we aangeven dat het om een op Qt5 gebaseerd systeem gaat (**figuur 8**). Dan moeten we aangeven of we de software



Figuur 7. Instelling van VisualGDB als Linux-project.

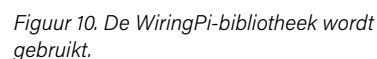
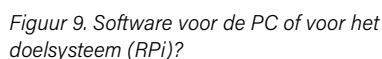


Figuur 8. Het gaat om een op Qt5 gebaseerd systeem.

Om de applicatie vanaf de desktop te starten moet het bestand *HV_PowerSupply.desktop* worden gekopieerd naar */home/pi/desktop*. Als het programma na het inschakelen automatisch moet starten, moet dit bestand ook in de directory */home/pi/.config/autostart* staan. Om de pictogrammen omhoog/omlaag correct weer te geven op de betreffende knoppen, moeten we de bestanden *collapse-arrow.png* en *expand-arrow.png* naar de directory */home/pi* kopiëren. Als u het buispictogram wilt weergeven in de taakbalk, moet het bestand *Tube.png* ook in */home/pi* staan. Als u de software ongewijzigd wilt gebruiken, hoeft u alleen de kant-en-klare bestanden uit de Elektor-download zoals beschreven naar de RPi te kopiëren.

Als u de software wilt wijzigen, moet u de hierboven beschreven softwarepakketten installeren en de bronbestanden van dit project kopiëren naar de map */VisualGDB/HV_PowerSupply/HV_PowerSupply*. Het project bestaat uit de volgende bronbestanden:

- *HV_PowerSupply.cpp*: hoofdprogramma (*MainWindow.cpp* wordt gestart).
- *MainWindow.cpp*, *MainWindow.h*, *ui_MainWindow.h*: bronbestanden voor de voeding.
- *CurveTracerWindow.cpp*, *CurveTracerWindow.h*, *ui_CurveTracerWindow.h*: bronbestanden voor de buis-karakteristiekenschrijver.
- *TransistorCurveTracerWindow.cpp*, *TransistorCurveTracerWindow.h*, *ui_TransistorCurveTracerWindow.h*: bronbestanden voor de transistor-karakteristiekenschrijver.
- *Hardware.cpp*, *hardware.h*: gedeelde functies voor het aansturen van de D/A-

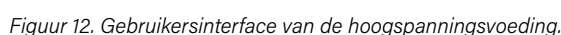


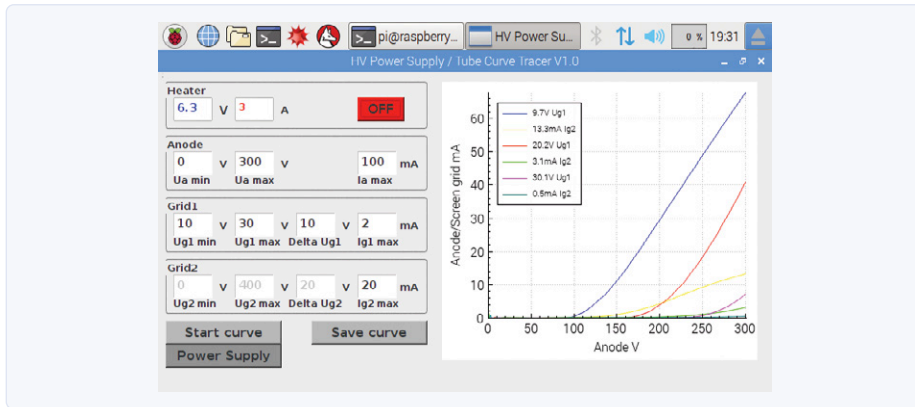
- `Qcustomplot.cpp`, `qcustomplot.h`: bibliotheek voor grafische weergave van de karakteristieken. Om ervoor te zorgen dat deze bibliotheek correct wordt vertaald, moet de regel `QT += core gui xml printsupport` worden toegevoegd aan het bestand `debug.pro`.

De bestanden *ui_XXXX.h* worden door Qt Designer gegenereerd nadat de grafische

interfaces voor de afzonderlijke schermen zijn getekend. In **figuur 11** ziet u het scherm voor de voeding. Door *Form* > *Generate code* te selecteren in het menu wordt de broncode gegenereerd. Het hoeft dan alleen nog maar in de bronmap te worden opgeslagen.

Als het programma start, wordt het voedings-scherm weergegeven en wordt de hardware geïnitieerd. Alle spanningen en stromen worden in eerste instantie op 0 gezet. Daarna





Figuur 13. Het venster van de buis-karakteristiekenschrijver.

kunnen de spanningen en stromen voor de afzonderlijke uitgangen worden ingesteld. Dat kan door de omhoog/omlaag-toetsen op het scherm aan te raken, met een extern toetsenbord en muis via USB of met een virtueel toetsenbord zoals het Matchbox-toetsenbord [9] (figuur 12).

Als de schermrooster-spanning de anodespanning moet volgen, activeert u met de knop *Track/Sep* de tracking-modus. De spanning voor de gloeidraad kan ofwel van 0...14 V met *Var* worden ingesteld, of op de vooraf gedefinieerde waarden 4/6,3/12 V worden gezet. Met de *On/Off*-toetsen kunnen de individuele uitgangen afzonderlijk worden in- of uitgeschakeld.

Buis-karakteristiekenschrijver

De knop *Tube Curve Tracer* activeert het scherm van de buis-karakteristiekenschrijver. Om te beginnen worden alle spanningen en stromen dan op 0 gezet.

In deze modus worden karakteristieken van buizen opgenomen en, indien nodig, opgeslagen als tabellen met de extensie .csv, zodat ze direct kunnen in bijvoorbeeld Excel kunnen worden ingelezen. U kunt minimum- en maximumwaarden voor de anode- en stuur-

spanning instellen. Ook kunt u maximale waarden instellen voor de anode-, stuurrooster- en schermroosterstroom. De spanning op het schermrooster volgt de anodespanning. Er kunnen maximaal vijf curven worden weergegeven.

Figuur 13 toont de opgenomen karakteristieken van een EL34. De curven tonen de anodestroom als functie van de anodespanning met de spanning op het stuurrooster als parameter. De bijbehorende schermroosterstromen worden ook opgenomen.

De karakteristieken kunnen worden opgeslagen door op de knop *Save Curve* te drukken. Er verschijnt dan een dialoogvenster waarin u de gemeten gegevens kunt opslaan als een bestand met de extensie .csv. U kunt de bestanden met bijvoorbeeld WinSCP kopiëren naar de PC en verder verwerken met Excel. De Elektor-download [1] bevat een voorbeeldbestand *EL34.csv*.

Voor het testen van EL34-eindbuizen heb ik een adapter gebouwd die gemakkelijk met een kabel op de voeding kan worden aangesloten (figuur 14). Het simpele schema van deze adapter is te zien in **figuur 15**.

Met andere buisvoeten kunt u adapters voor andere soorten buizen bouwen volgens

hetzelfde principe. Maar u kunt de te testen buis ook gewoon rechtstreeks op de klemmen van de voeding aansluiten.

Halfgeleider-karakteristiekenschrijver

Met de knop *Semiconductor Curve Tracer* roept u het scherm van de halfgeleider-karakteristiekenschrijver op. In **figuur 16** ziet u een voorbeeld van het gedrag van een sperrende bipolaire transistor met niet-aangesloten basis.

Ook voor het testen van halfgeleiders kan een adapter nuttig zijn. **Figuur 17** is het schema van de halfgeleideradapter en in **figuur 18** ziet u het prototype. **Figuur 19** toont het inwendige.

Connector SV1 is de aansluiting naar de karakteristiekenschrijver. De gloeispanning wordt gebruikt om relais K1 en K2 te voeden, die zorgen voor de omschakeling PNP/NPN of NMOS/PMOS. De stuurroosterspanning wordt gebruikt voor K3. Dit relais schakelt de basisstroom of de gatespanning. De anodespanning wordt gebruikt voor het voeden van de collector/emitter of de drain/source. Om zenerdiodes te testen moet de anode worden aangesloten op de negatieve pool en de kathode op de positieve pool van de anodespanning.

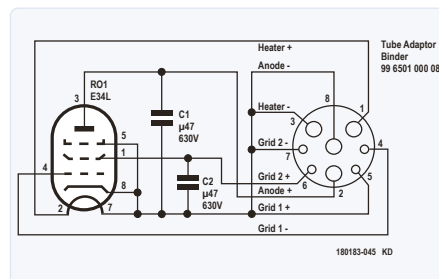
Om bipolaire transistoren te testen, wordt de schermroosterspanning gebruikt om de basisstroom te genereren. Deze wordt door R2 en R3 beperkt tot 4 mA bij 400 V. Om MOSFET's te testen wordt R1 gebruikt als spanningsdelers om de gatespanning te genereren. D3 en D4 beperken U_{GS} tot maximaal 19 V.

Zenerdiodes en $U_{ce(max)}$ van bipolaire transistoren

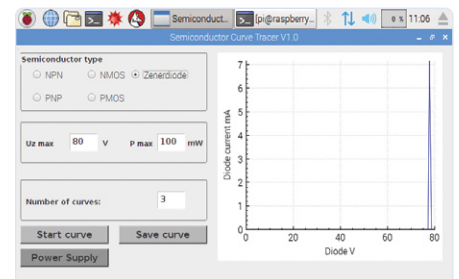
Na aanklikken van *Zenerdiode* verandert de tekst in de velden *Ucemax* en *Ic max* in *Uz* en *Pmax* (figuur 16), omdat voor zenerdiodes meestal het maximale vermogen wordt opgegeven. Na het indrukken van de



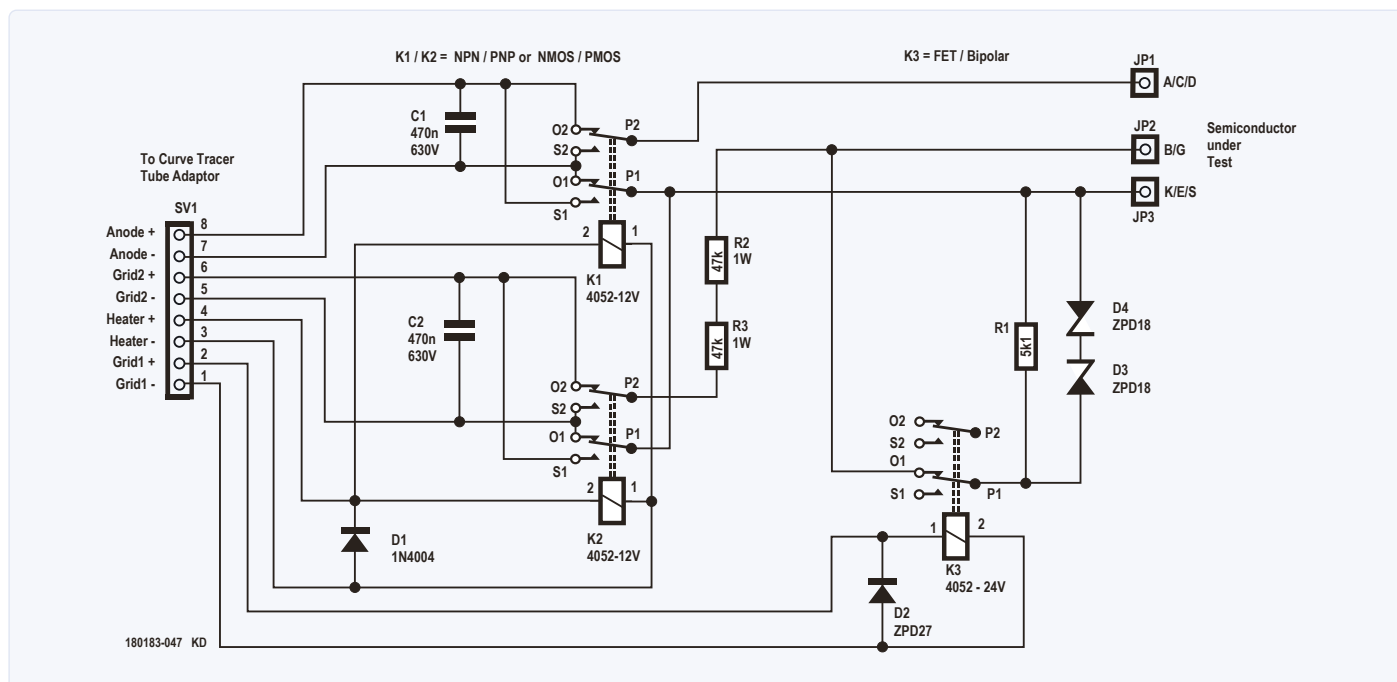
Figuur 14. Buisadapter voor een EL34.



Figuur 15. Schema van de buisadapter.



Figuur 16. Maximale collector/emitter-spanning van een geteste BC547C.



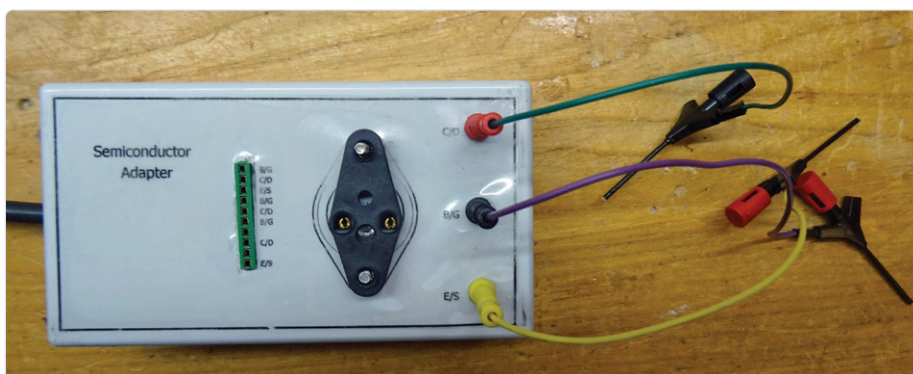
Figuur 17. Schema van de halfgeleideradapter.

knop **Start curve** wordt de anodespanning verhoogd van 0... U_z en tot maximaal P_{max} (welke van beide het eerst wordt bereikt). Als de stroom door de zenerdiode bij U_z minder is dan 1% van de maximale zenerstroom, wordt een foutmelding weergegeven (figuur 20). Dan is de zenerdiode defect of moet U_z worden verhoogd.

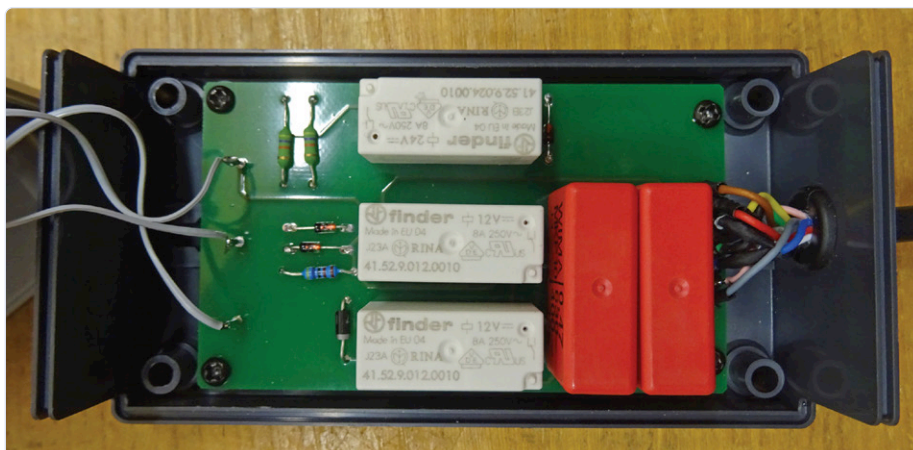
Vanwege de hoge mogelijke anodespanning kan ook de maximale collector/emitter-spanning bij open basis van veel bipolaire transistoren ($= U_{ce0\ max}$) worden getest. De curve in figuur 16 is opgenomen bij het testen van een BC547C. Hoewel de datasheet slechts 45 V aangeeft, bereikte deze transistor een maximale U_{ce0} van >75 V.

Testen van bipolaire transistoren

Voor bipolaire transistoren moet **NPN** of **PNP** worden geselecteerd. We kunnen $U_{ce\ max}$, $I_{c\ max}$ en het aantal te meten curven instellen. Na de start controleert de software of er ook zonder basisstroom al een significante collectorstroom loopt. In dat geval wordt de test afgesloten met een foutmelding. Anders wordt $U_{ce\ max}$ ingesteld op de geselecteerde waarde en wordt de basisstroom verhoogd tot $I_{c\ max}$ wordt bereikt. Als de ingestelde collectorstroom niet kan worden bereikt bij de maximale basisstroom van 4 mA, wordt ook een foutmelding gegeven.



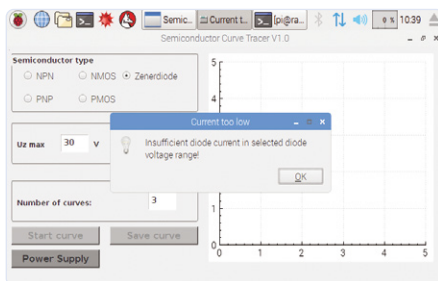
Figuur 18. De halfgeleideradapter van buiten...



Figuur 19. ...en van binnen



Figuur 21. De voorkant van het prototype.



Figuur 20. Foutmelding wanneer de stroom door de zenerdiode te laag is.

Dan wordt de karakteristiek $I_c = f(U_{ce})$ weergegeven met als parameter verschillende basisstromen, die in de legenda worden genoemd. Met de knop **Save Curve** kunnen we de gegevens van de karakteristiek van I_c , I_b en U_{ce} opslaan als een bestand met de extensie .csv.

Testen van MOSFET's

Bij MOSFET's moet u kiezen tussen *NMOS* of *PMOS*. De maximale waarden voor $U_{ds\ max}$ en $I_{d\ max}$ en het aantal te tekenen lijnen kunnen worden ingesteld. Na de start controleert de software of er al een drainstroom loopt bij $U_{gs} = 0$. In dit geval wordt de test afgesloten met een foutmelding. Anders wordt de waarde voor $U_{ds\ max}$ ingesteld en wordt U_{gs} verhoogd tot $I_{d\ max}$ wordt bereikt. Als de maximale drainstroom niet kan worden bereikt bij $U_{gs\ max} = 18\ V$, wordt weer een foutmelding weergegeven.

De karakteristieken $I_d = f(U_{ds})$ worden weergegeven met verschillende waarden van de gatespanning als parameter, die weer in de legenda worden weergegeven. Met de knop **Save Curve** kunnen de karakteristieken van I_d , U_{gs} en U_{ds} worden opgeslagen als een bestand met de extensie .csv.

Pas op!

Wees voorzichtig bij het instellen van de maximale drain/collector-stroom en de maximale drain/source- of collector/emitter-spanning!

Bij een instelling van 400 V bij een stroomsterkte van 300 mA is de dissipatie in de geteste transistor 120 W! De SOA-specificaties van de datasheet moeten strikt worden nageleefd en de TUT (*Transistor Under Test*) moet eventueel worden gekoeld.

Tot slot

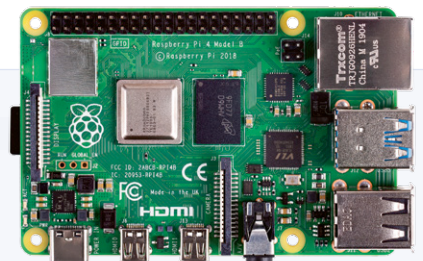
Het gratis downloadbestand [1] bevat de PCB-bestanden in Eagle-formaat en de onderdelenlijsten. Ook het ontwerp van de frontplaat, de LTSpice-bestanden en de volledige broncode zijn daar te vinden en zijn vrijgegeven voor privé gebruik. Tot slot toont **figuur 21** het vooraanzicht van het prototype. ◀

180183-04



SHOPPING LIST

- > **Raspberry Pi 4 B (2 GB RAM)**
www.elektor.nl/raspberry-pi-4-b-2-gb-ram
- > **7"-touchscreen voor Raspberry Pi**
www.elektor.nl/joy-it-7-touchscreen-for-raspberry-pi
- > **JOY-iT JT-RD6006 DC Power Supply Bundle**
www.elektor.nl/joy-it-jt-rd6006-dc-power-supply-bundle



WEBLINKS

- [1] **Projectpagina bij dit artikel:** www.elektormagazine.nl/180183-04
- [2] **FrontDesign:** www.schaeffer-ag.de/frontplatten-designer
- [3] **Visual Studio:** <https://visualstudio.microsoft.com/de/downloads/>
- [4] **Cross-Compiler voor RPi:** <https://visualgdb.com/download/>
- [5] **Qt Designer:** <https://build-system.fman.io/qt-designer-download>
- [6] **WiringPi:** <http://wiringpi.com/>
- [7] **WinSCP:** <https://winscp.net/eng/download.php>
- [8] **QCustomPlot:** www.qcustomplot.com/index.php/download
- [9] **Matchbox-Keybord:** <https://github.com/xlab/matchbox-keyboard>