

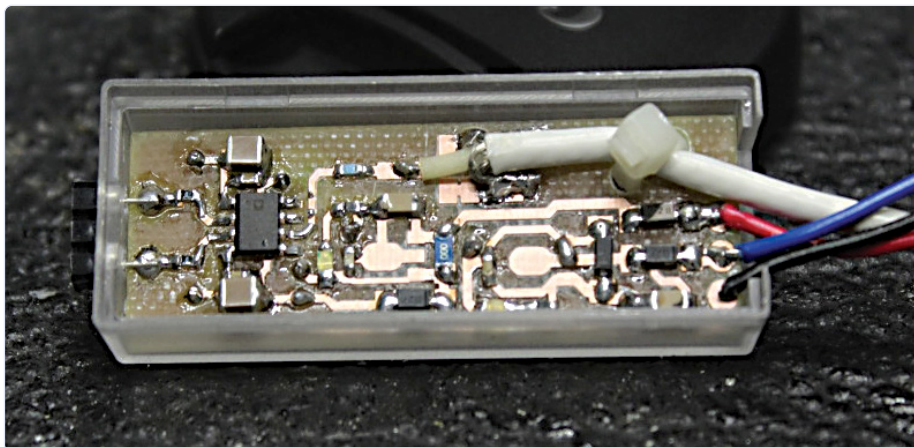
Differentiële stroomprobe 2.0

voor oscilloscopen

stroom meten met de oscilloscoop

Alfred Rosenkränzer (Duitsland)

We beschrijven hier een differentiële stroomprobe voor oscilloscopen met een single-ended uitgang en een grote bandbreedte. De standaard versterking van 2x kan worden vergroot met één enkele weerstand!



Figuur 1. Prototype van versie 1.0 van de probe [1].

PROJECT-INFO

Tags

meten, oscilloscoop, stroom

Niveau

Gevorderd

Benodigde tijd

ca. 2 uur

Gereedschappen

Soldeergereedschap (SMD en through-hole), mechanisch gereedschap

Kosten

ca. € 30...40

De '2.0' in de titel geeft aan, dat dit niet de eerste stroomprobe van de auteur is. In **figuur 1** ziet u het prototype van de probe van Alfred Rosenkränzer, die vier jaar geleden in Elektor werd gepubliceerd [1]. Qua bandbreedte blijft die ver achter in vergelijking met de hier beschreven meetkop. De motivatie voor de ontwikkeling is duidelijk: terwijl versie 1.0 slechts een maximale bandbreedte van 130 kHz kon bieden, wint versie 2.0 het in dat opzicht duidelijk. Deze vooruitgang gaat wel gepaard met een gereduceerd common mode-bereik van de ingangen, maar leest u zelf!

Stroomprobe voor oscilloscopen

De oscilloscoop is de onbetwiste nummer 2 in de hiërarchie van meetinstrumenten. Op nummer 1 staat natuurlijk de multimeter, maar met een oscilloscoop kunnen we dynamisch gedrag beoordelen. De 'scoop heeft echter een belangrijk nadeel: normaal gesproken kan een oscilloscoop niet rechtstreeks stromen meten. Een stroomprobe vormt de oplossing. Het is lastig om het dynamisch gedrag van stromen in een schakeling te meten: natuurlijk kunnen we ergens een shuntweerstand tussenvoegen (of meten over een bestaande weerstand). De spanningsval over die weerstand is te meten met een normale spanningsprobe. De versterker van zelfs goedkope oscilloscopen is gevoelig genoeg voor zulke metingen (minstens 5 mV/divisie). Helaas verbinden we dan wel de massa van de oscilloscoop met die weerstand, wat niet altijd wenselijk is gezien de storingsgevoeligheid. Bovendien bestaat, vooral bij een tweekanaals oscilloscoop, het gevaar op kortsluiting van delen van de schakeling als we tegelijkertijd met het tweede kanaal een spanning willen meten.

De oplossing voor het probleem is een kleine

verschilversterker die gewoon potentiaalvrij een klein spanningsverschil detecteert. Dat is niet moeilijk, omdat verschilversterkers een zogenaamd common mode-bereik hebben waarbinnen ze alleen spanningsverschillen versterken. Op de uitgang staat dan het spanningsverschil ten opzichte van de massa van de oscilloscoop. Zo kan een kleine spanningsval over een weerstand ergens in een schakeling heel goed en (tot op zekere hoogte) onafhankelijk van een gelijktijdige spanningsmeting worden gedetecteerd. Het mooiste van dit concept is dat er speciaal voor dit doel ontwikkelde IC's verkrijgbaar zijn. U hebt maar een paar extra componenten nodig en de sonde is klaar.

Eigenschappen

We hebben voor de instrumentatieversterker AD8421 van Analog Devices gekozen vanwege de grote bandbreedte tot 6 MHz. Met een prijs van minder dan € 10 is dit IC niet alleen goedkoop, maar het heeft ook nog eens een laag ruisniveau, een gering stroomverbruik en een grote common mode-onderdrukking. De gedetailleerde eigenschappen zijn te vinden in het kader **AD8421 – technische gegevens**; de datasheet van de fabri-

kant [2] geeft nog meer informatie.

Helaas heeft de AD8421 ook een belangrijk nadeel in vergelijking met de AD8479 die in de eerste versie werd gebruikt: het IC in versie 1.0 had een common mode-bereik van $\pm 200 \dots 600$ V, maar de ingangen van de AD8421 moeten binnen het bereik van zijn voedingsspanning blijven. Een voedingsspanning van ± 15 V levert dus een bruikbaar common-mode bereik van de ingangen van ongeveer ± 12 V. Op het eerste gezicht lijkt dat weinig, maar helaas zijn er onder de halfgeleiders geen schape met vijf poten die aan alle wensen kunnen voldoen. Gebruik dus versie 1.0 uit 2016 bij metingen aan schakeling met een hoge voedingsspanning en kies voor versie 2.0 als u snelle signalen wilt meten in schakelingen met een lagere voedingsspanning. Het enige wat u hoeft te doen is voor elke situatie het juiste gereedschap te kiezen.

Het schema van de probe

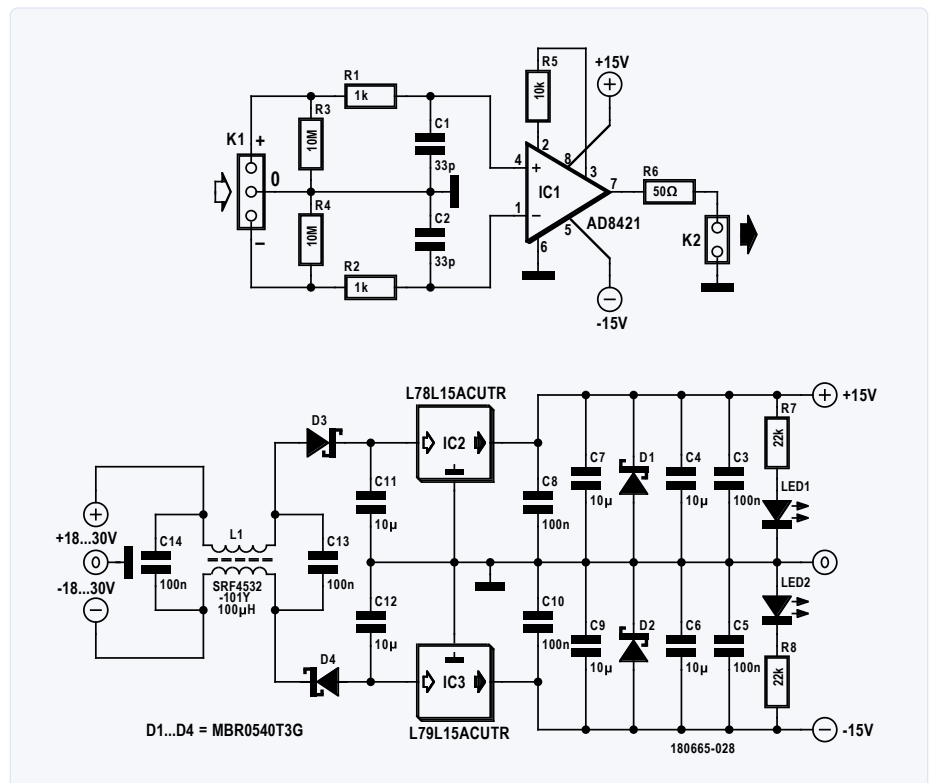
Het ontwerpidee van Alfred Rosenkränzer overtuigde ook Elektor, en dus nam Ton Giesberts van Elektor Labs zijn idee over en poetste het een beetje op. De resulterende schakeling van **figuur 2** is berekend voor een versterking van twee maal. Deze versterking wordt ingesteld met R5. Er geldt:

$$A = 1 + (9,9 \text{ k}\Omega / R5)$$

Als we R5 weglaten, is volgens de datasheet de versterking éénmaal bij een bandbreedte van 10 MHz, omdat R5 dan vrijwel oneindig is. Met de gekozen waarde van 10 k Ω voor R5 is de versterkingsfactor precies 1,99, dat wil zeggen een fout van 0,5% ten opzichte van de genoemde factor 2, en dat is nauwkeuriger dan de gebruikte weerstanden. De bandbreedte bij deze versterking is > 6 MHz; we maten zelfs rond de 8 MHz. Als u de voorkeur geeft aan een andere versterking: zelfs bij een versterking van 100 maal haalt de AD8421 nog steeds 2 MHz!

De ingangsfilters (R1/C1 en R2/C2) vormen een simpele bescherming tegen overspanningen en kortdurende transiënten. Bovendien corrigeren ze de lichte versterking van de AD8421 in de buurt van de kantelfrequentie, waardoor de frequentierespons van de probe wordt gelineariseerd.

Hoewel de AD8421 zeer robuuste ingangen heeft, moet langdurige overspanning worden vermeden. Zoals al eerder vermeld is het bruikbare common mode-bereik van de ingangsspanningen door de voeding van ± 15 V beperkt tot iets meer dan ± 12 V. De sonde heeft eigen spanningsregelaars en



Figuur 2. Complete schakeling van de tweede versie van de probe. Merk op dat aan het genereren van de voedingsspanningen veel aandacht is besteed.

een EMC-filter dat bestaat uit C13, C14 en de common mode-smoorspoel L1 om eventuele stoorsignalen uit de voeding van de sonde te onderdrukken. Dat is belangrijk als hij uit een schakelende voeding moet worden gevoed. Voor incidenteel gebruik kan de schakeling worden gevoed uit een symmetrische laboratoriumvoeding of beter nog uit een kleine aparte voeding. D3 en D4 zijn overigens niet bedoeld om een wisselspanning te gelijkrichten, maar bieden bescherming tegen verkeerde polariteit!

LED1 en LED2 geven aan dat beide voedingsspanningen aanwezig zijn en dat de probe actief is. De serieweerstanden R7 en R8 zijn zo hoogohmig dat de LED's niet direct verblinden. De twee 10 M Ω -weerstand R3 en R4 trekken ook open ingangen naar massapotentiaal, zodat de output van het IC dan ook 0 V levert. Zo krijgen we ook een gedefinieerde, hoge ingangsimpedantie. De 50 Ω -weerstand R6 is nodig voor aanpassing aan een coaxkabel, omdat de output van IC1 laagohmig is.

Voeding

Omdat er slechts zeer kleine stromen lopen, is een 1,5VA-transformator van 2 x 12 V of 2 x 15 V secundair plus een bruggelijkrichter en twee filtercondensatoren van 220 μ F/35 V, zoals weergegeven in **figuur 3**, ruimschoots

AD8421 - TECHNISCHE GEGEVENS

Voeding:

$\pm 2.5 \dots \pm 18$ V

Stroomverbruik:

max. 2,3 mA

Ruis:

max. 3,2 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ bij 1 kHz

max. 200 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ bij 1 kHz

Bandbreedte:

10 MHz @ versterking = 1

2 MHz @ versterking = 100

CMRR:

94 dB @ DC, versterking = 1

80 dB @ 20 kHz, versterking = 1

Slew rate:

35 V/ μ s

Drift:

0,2 μ V/ $^{\circ}$ C

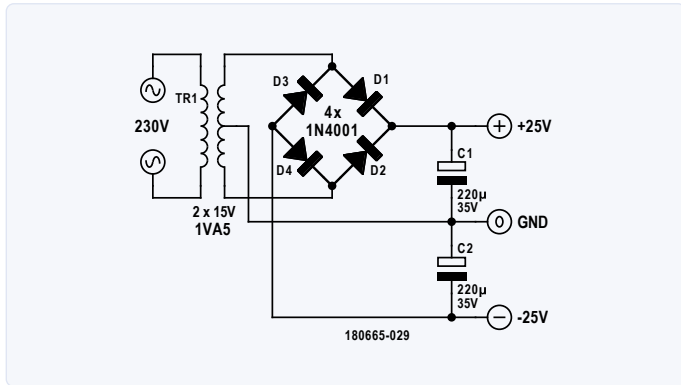
Ingangsoffset:

1 ppm/ $^{\circ}$ C van de versterking @ factor 1

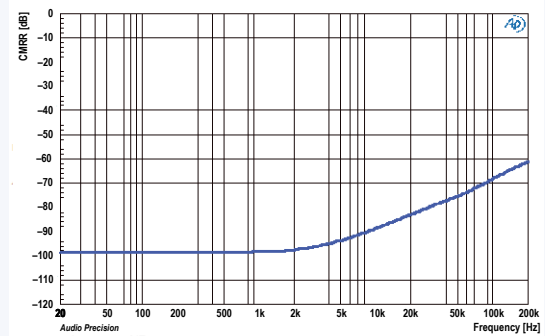
Ingangsbeveiliging:

max. 40 V tussen '+IN' en '-VS'

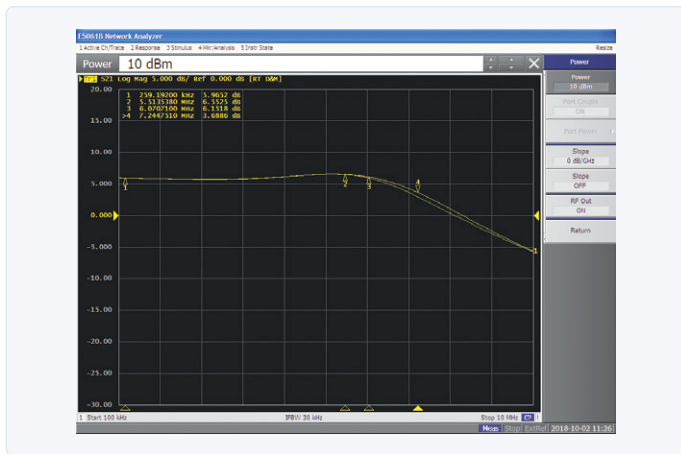
max. 40 V tussen '-IN' en '+VS'



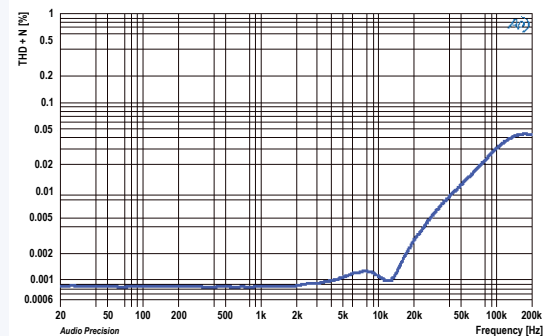
Figuur 3. Schema van een eenvoudige voeding (transformator, bruggelijkrichter en afvalkelco's).



Figuur 4. De gemeten common mode-onderdrukking als functie van de frequentie.



Figuur 5. De frequentieresponsie van de probe loopt tot ongeveer 8 MHz.



Figuur 6. De vervorming neemt sterk toe boven 10 kHz, maar ligt bij 200 kHz nog steeds op een zeer laag niveau.

voldoende. Metingen lieten geen verschillen zien tussen deze voeding en een laboratoriumvoeding. De rimpelspanning is door de lage belasting heel bescheiden met ongeveer 200 mV_{tt}.

De gebruikte 15 V-spanningsregelaars verdragen een ingangsspanning van 17,5...35 V. Door de twee Schottky-dioden D3 en D4 kan de probe worden gevoed met spanningen vanaf ± 18 V. Een kleine 12V-transformator (TR1) kan al volstaan, omdat kleine transformatoren een hoge impedantie hebben en een aanzienlijk hogere nullastspanning leveren bij een geringe belasting. Zelfs na aftrek van het spanningsverlies van $\pm 0,7$ V over D1... D4 vinden we toch vaak tot ± 20 V aan de uitgang van de voeding. Maar u moet dat in elk geval controleren. Een kleine 18V-transformator kan onder bepaalde omstandigheden al snel meer dan ± 35 V aan de uitgang leveren, en dat moeten we voorkomen. Met een kleine 15V-transformator is ongeveer ± 26 V aan de

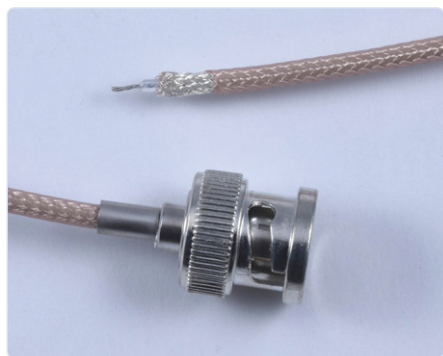
uitgang te verwachten.

Er zijn ook tests uitgevoerd om het gedrag bij een lagere voedingsspanning te bepalen. We gebruikten een 1kHz-signaal met een amplitude van 3 V_{tt} en vonden aan de uitgang 6 V_{tt} vanwege de versterking. De kleine voedingsunit werd aangesloten op een regeltransformator en de ingangsspanning werd continu verlaagd. Zolang de voedingsspanning van de voeding boven ± 12 V bleef, hebben we geen veranderingen waargenomen, maar daaronder begon het signaal aan de uitgang van de probe te clippen. Geen wonder, want over D3/ D4 en de spanningsregelaars valt meer dan 2 V en dan er is niet veel reserve meer over voor de uitgang van IC1. Het feit dat er zelfs bij iets meer dan ± 12 V geen vervorming was, ook al regelen de twee spanningsregelaars dan niet meer, bewijst de uitstekende onderdrukking van de effecten van de voedingsspanning bij de AD8421 (≥ 100 dB @ 100 Hz).

Metingen

Voor een 1kHz-signaal met 3 V_{tt} op beide ingangen is de common mode-onderdrukking >98 dB. Die neemt vanaf 2 kHz gestaag af tot 61 dB bij 200 kHz (zie **figuur 4**). Dat is beter dan verwacht, ondanks het feit dat de componenten van het ingangsfILTER van R1/ C2 en R2/ C2 ondanks de kleine tolerantie niet volledig identiek zijn.

Een single-ended meting van een functiegenerator via één ingang (de andere ingang was geaard) resulteerde in een reële bandbreedte van ongeveer 8 MHz (in vergelijking met 1 kHz). Bij lage versterkingsinstellingen met R5 is er een kleine toename van de versterking in de buurt van de kantelfrequentie met een maximale waarde bij 7 MHz (zie **figuur 5**). De ingangsfilters hebben een kantelfrequentie van 4,8 MHz (zonder rekening te houden met de bronimpedantie), wat deze stijging compenseert. Deze verhoging is er de oorzaak van dat de bandbreedte van de probe groter is dan

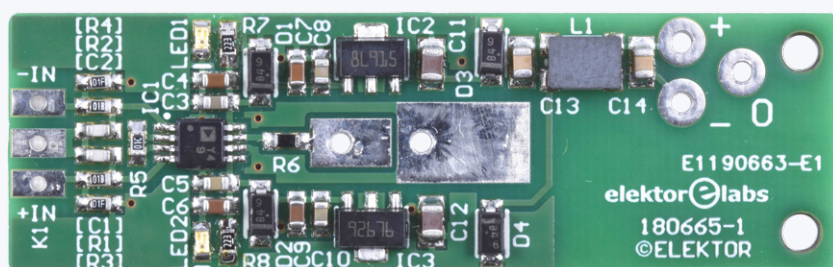


Figuur 7. RG316-coaxkabel met gestript uiteinde en krimpconnector aan het andere einde.

verwacht. Bij 8 MHz is de faseverschuiving van het uitgangssignaal echter meer dan 180°. Sinussignalen in het MHz-bereik zien er meer driehoekig uit. De vervorming neemt gestaag toe bij signalen > 10 kHz (zie **figuur 6**).

Kabels

Een RG316-coaxkabel is geschikt om de uitgang te verbinden met de oscilloscoop; deze kabel wordt per meter verkocht. Maar voor het aansluiten van een BNC-connector aan de kant van de 'scoop hebt u het juiste krimptool nodig. Als u dat niet hebt, kunt u gewoon een complete BNC-coaxkabel kopen, aan één kant een connector verwijderen, de kabel strippen (zie **figuur 7**) en deze rechtstreeks op de print solderen. Als u een lange BNC-kabel koopt en deze in het midden splitst, hebt u twee kabels voor twee probes. De print heeft in het midden grote pads waar de RG316-kabel direct aan gesoldeerd kan worden (zie **figuur 8**) – zowel de middengeleider als de afscherming. De voedingslijnen kunnen aan de drie pads in de rechterbovenhoek worden gesoldeerd. Alle vijf deze pads hebben gaten waarin ook een 1,3mm-soldeerpen past. Als u soldeerpenen gebruikt, moet u ze een beetje inkorten om de print in de aanbevolen behuizing te laten passen. Met een kleine kabelbinder door de 2,5mm-gaten uiterst rechts kunt u alle draden die uit de probe komen fixeren (**figuur 9**). Hotmelt kan hier ook goed werken. Maar lees de volgende paragraaf over de bouw voordat u de kabels aansluit. Als 'socket' voor de meetsnoeren kunt u het beste een driepolig deel van een SIL-busstrip (met 'gedraaide' contacten vanwege de betere kwaliteit) plat op de drie pads aan de linkerkant van de print solderen (**figuur 8**). In **figuur 9** ziet u hoe de complete probe er na montage uit ziet.



Figuur 8. De volledig gemonteerde print van het prototype. Voor de 0603-SMD's is een vaste hand nodig.

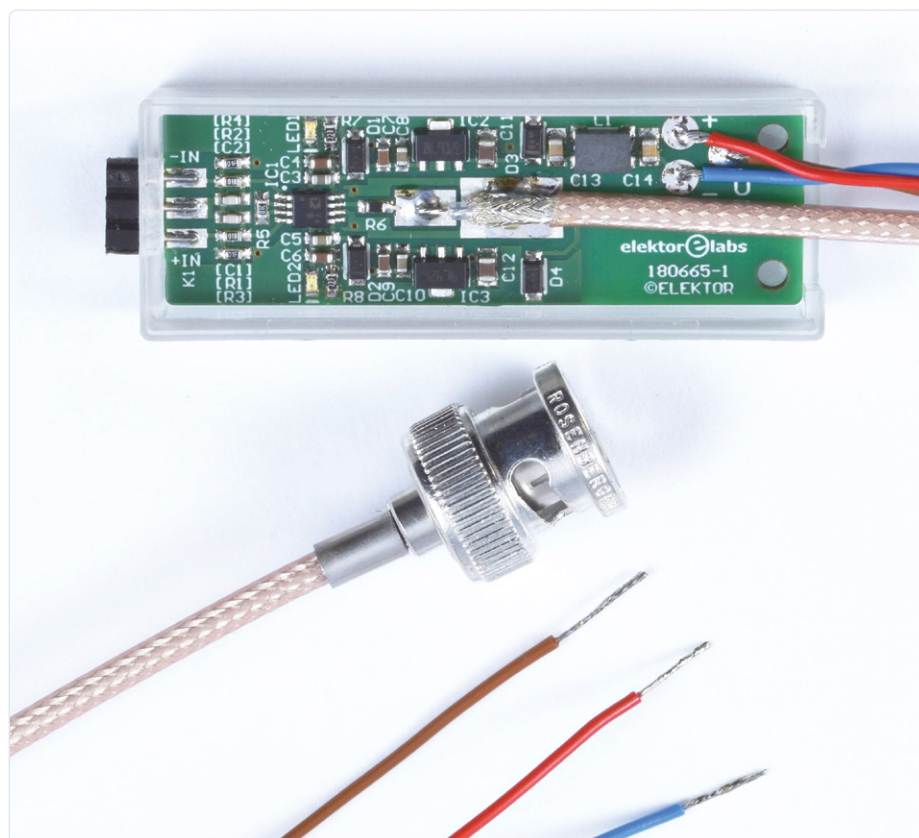
Bouw

In de onderdelenlijst is een geschikte behuizing aangegeven. Eerst maken we aan de linkerzijde van de behuizing een rechthoekig gat voor de driepolige SIL-connector. Plaats dan de volledig opgebouwde en geteste printplaat in de behuizing, steek de driepolige SIL-busstrip links door de sleuf en soldeer deze aan de printplaat.

Nu is het de beurt aan de coaxkabel. Onze suggestie: gebruik RG316-kabel. De BNC-connector moet geschikt zijn voor RG316! Er zijn

veel BNC-varianten voor verschillende kabels. Zie de onderdelenlijst. De in het prototype gebruikte kabel heeft een buitendiameter van 2,9 mm. Als u geen ervaring hebt met zulke connectoren, kunt u het beste de website van de fabrikant raadplegen om te weten te komen hoe u de kabel correct moet strippen om de BNC-connector aan te sluiten.

Om de coaxkabel aan de pads op de printplaat te solderen, moet eerst 12 mm van de mantel worden gestript. Kort vervolgens de (gevlochten) afscherming in tot 6 mm. Verwijder dan



Figuur 9. Het in de behuizing geïnstalleerde prototype met aangesoldeerde kabels en SIL-busstrip.



ONDERDELENLIJST

Weerstanden (alle 1%, 100 mW, SMD 0603):

R1,R2 = 1k
R3,R4 = 10M
R5 = 10k
R6 = 50Ω
R7,R8 = 22k

Condensatoren:

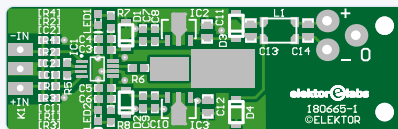
C1,C2 = 33p/50V, 1%, C0G/NP0, SMD 0603
C3,C5,C8,C10 = 100n/50V, 10%, X7R, SMD 0603
C4,C6,C7,C9 = 10μ/25V, 20%, X5R, SMD 0603
C11,C12 = 10μ/35V, 10%, X5R, SMD 0805
C13,C14 = 100n/100V, 10%, X7R, SMD 0805

Spoel:

L1 = 100 μH @ 100 kHz, common mode-smoerspoel, 200 mA, SMD, bijv. SRF4532-101Y, Bourns

Halfgeleiders:

IC1 = AD8421ARMZ, MSOP 8
IC2 = L78L15ACUTR, SOT-89
IC3 = L79L15ACUTR, SOT-89
LED1,LED2 = LED, rood, SMD 0603
D1...D4 = MBR0540T3G, SOD-123



De componentenzijde van de in het Elektorlab ontworpen print.

Diversen:

K1 = driepolige SIL-busstrip, verticaal, raster 2,54 mm
driepolige SIL0pinheader voor aansluiting van de meetkabel*
coaxiale kabel RG316, 50Ω, ø 2,9 mm, 1 m, bijv. Conrad 606450*
BNC-krimconnector voor RG316, 50Ω, bijv. Conrad 1490723*.
Behuizing USB1KL, 56x20x12 mm, bijv. Conrad 531276*.
Alternatieve behuizing: TC-USB1 KL203, 56x20x12 mm
Print 180665-1 v1.0*.

* zie tekst

4 mm van de isolatie van de middengeleider. Deze is dan 2 mm verwijderd van de gevlochten afscherming. Soldeer eerst de middengeleider, dan de afscherming. Bij dat laatste moet u snel werken. Figuur 9 laat zien hoe de soldeerverbinding eruit moet zien.

Nu zijn de drie voedingslijnen aan de beurt, en tenslotte de meetsnoeren. Soldeer drie dunne litzedraden aan een driepolige SIL-header. We hebben bij ons prototype tijdelijk twee dunne koperlakdraden aan een SIL-header gesoldeerd (**figuur 10**). Tenslotte kan het deksel erop en is de sonde klaar voor gebruik.

Meten

De voeding van de sonde moet galvanisch gescheiden zijn van de te onderzoeken schakeling. Daarom is het het beste om een aparte voeding te gebruiken zoals in figuur 3. Verbind altijd de massa van de ingang met de massa van de schakeling! De meetpunten kunnen een common-mode spanning verdragen van maximaal ±12 V ten opzichte van massa – niet meer.

Met betrekking tot de connector voor de meetsnoeren: de mechanische levensduur van gedraaide SIL-contacten is meestal een paar honderd maal insteken en uittrekken. Ze zouden daarom jarenlang mee moeten gaan. Indien nodig kan de aan de print gesoldeerde connector gemakkelijk worden vervangen, omdat de pennen niet door gaten worden gestoken, maar plat op de pads worden gesoldeerd.

In plaats van de middelste pin van deze connector te gebruiken als massa, kunt u ook gewoon de '0' van de print verbinden met de massa van de te meten schakeling. Dankzij de hoge common-mode onderdrukking van de probe is het onwaarschijnlijk dat dit tot veel storing, brom of ruis zal leiden.

Bij gebruik van meerdere probes die op dezelfde voeding zijn aangesloten, mag u natuurlijk slechts één massaverbinding met de

METINGEN AAN HET PROTOTYPE

Voeding met de voedingsschakeling van figuur 3 (12V-trafo): ±18,9 V.

Stroomopname per tak ongeveer 5...6 mA.

Het leeuwendeel komt voor rekening van de spanningsregelaars en de LED's.

Maximale waarden voor een 1kHz-signaal van 4,8 Vtt:

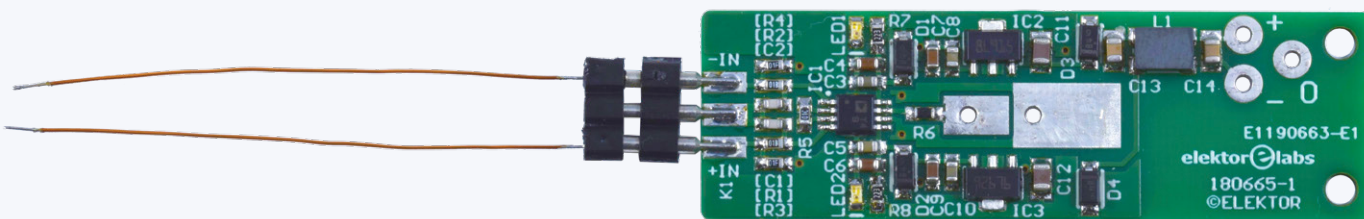
U_{out} : 9,52 V @ belasting = 100 kΩ
THD+N: 0,1%,

Typische waarden voor een 1kHz-signaal van 3 Vtt:

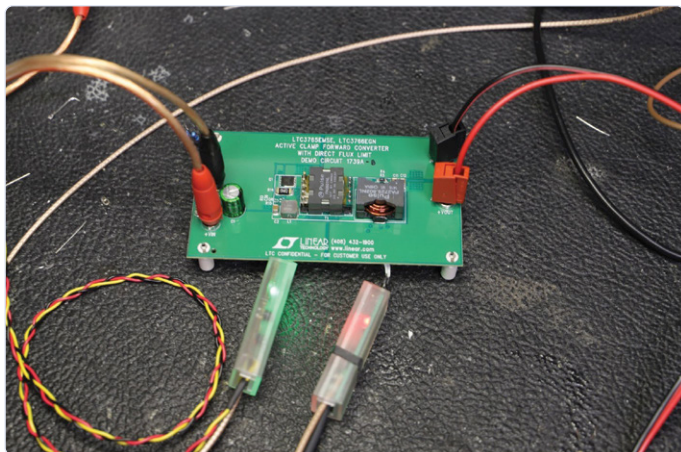
U_{out} : 5,97 V @ belasting = oscilloscoop-ingang
THD+N: 0,00025 % @ B = 22 kHz
0,00083 % @ B > 500 kHz

Common mode-onderdrukking bij 3 Vtt op beide ingangen

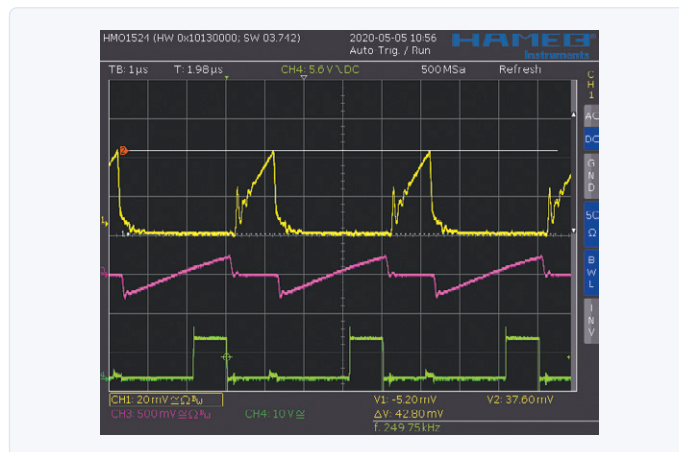
CMRR: >98 dB @ 20...1.000 Hz
>60 dB @ 200 kHz



Figuur 10. Bij wijze van test werden twee dunne koperlakdraden aan een driepolige SIL-header gesoldeerd en als 'meetsnoeren' gebruikt. De massa moet dan elders worden aangesloten.



Figuur 11: Alfred Rosenkränzer gebruikt hier twee probes bij metingen aan een schakelende voeding.



Figuur 12: De probe 2.0 kan ook snelle stroomvariaties detecteren.

te meten schakeling maken, anders ontstaat er een nare aardlus.

Ook belangrijk: als de voedingsspanning van de onderzochte schakeling >12 V is, moet u vóór het aansluiten van de meetsnoeren over een shuntweerstand eerst met een multimeter controleren of de spanning op beide punten binnen het common mode-bereik van ± 12 V blijft.

In **figuur 11** gebruiken we twee probes op een kleine schakelende regelaar. **Figuur 12** bewijst dat deze sonde zeer snelle stroomveranderingen kan detecteren.

Last but not least: zoals altijd kunt u de layout-bestanden van de print gratis downloaden van de projectpagina bij dit artikel [3].

◀ 180665-04

Vragen of opmerkingen?

Hebt u vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel?

Stuur een e-mail naar de auteur of naar de redactie van Elektor, via redactie@elektor.com.



GERELATEERDE PRODUCTEN

- > **PeakTech 4350 Clamp Meter**
<https://www.elektor.nl/18161>
- > **Current Transformer for Oscilloscopes (150170-1)**
www.elektor.nl/18402
- > **OWON SDS1102 2-ch Digital Oscilloscope (100 MHz)**
www.elektor.nl/18782

Een bijdrage van

Idee en schakeling: **Alfred Rosenkränzer**
Bewerking en tekst: **Ton Giesberts**

Schema's: **Patrick Wielders**
Redactie: **Dr. Thomas Scherer**

Vertaling: **Evelien Snel**
Layout: **Giel Dols**

WEBLINKS

- [1] "Stroommeetkop voor oscilloscoop", september/oktober 2016: <https://www.elektormagazine.nl/magazine/elektor-201609/39831>
- [2] Datasheet AD8421: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8421.pdf>
- [3] Projectpagina bij dit artikel: <http://www.elektormagazine.nl/180665-04>
- [4] Project op Elektor Labs: <https://www.elektormagazine.com/labs/differential-current-probe-180665>