

# sonde de courant différentielle pour oscillo – 2.0

## Mesurer les courants avec l'oscilloscope

Alfred Rosenkränzer

Voici une sonde de courant différentielle pour oscilloscopes à sortie asymétrique et à large bande passante. Le gain standard de 2 peut être augmenté en modifiant une seule résistance !

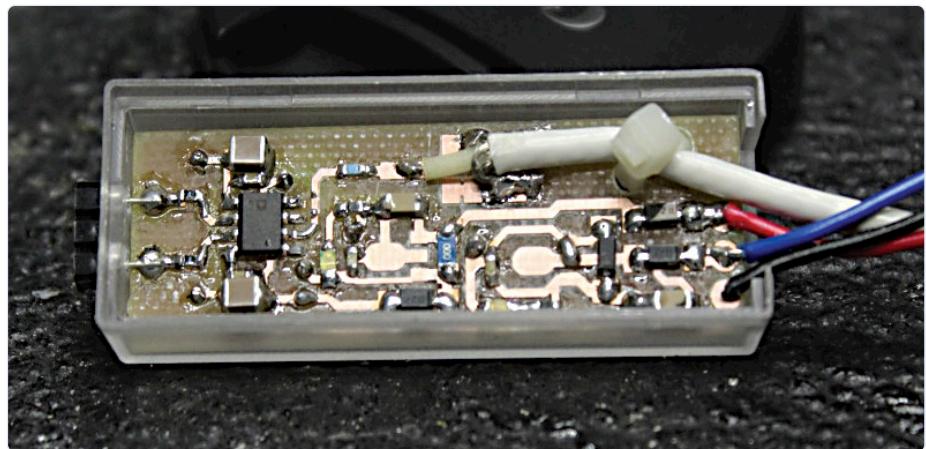


Figure 1. Prototype de la première version de la sonde [1].

### INFOS SUR LE PROJET

#### Mots clés

Mesure, oscilloscope, courant

#### Niveau

débutant – connaisseur – expert

#### Temps nécessaire

environ 2 h

#### Outils

Outils de soudure (CMS et câblés)  
Outilage mécanique

#### Coût

30 à 40 €

#### Sonde de courant pour oscillo

L'oscilloscope, n° 2 incontesté dans la hiérarchie des instruments de mesure, présente non seulement l'avantage par rapport au multimètre n°1 de pouvoir être utilisé pour évaluer la dynamique d'un signal, mais aussi un inconvénient décisif : normalement, un oscilloscope ne peut pas mesurer directement les courants. Sauf avec une sonde de courant ! Si vous voulez mesurer le comportement dynamique du courant dans un circuit, vous avez un problème : bien sûr, vous pourriez insérer une résistance shunt quelque part (ou utiliser une résistance existante) et mesurer la chute de tension à ses bornes avec une sonde de tension normale. La sensibilité de l'amplificateur vertical des oscilloscopes, même bon marché, descend jusqu'à au moins 5 mV par division, et suffit pour de telles mesures. Malheureusement, le conducteur de masse de l'oscilloscope est alors relié à cette résistance, ce qui peut entraîner des perturbations gênantes. De plus, surtout avec un oscilloscope à deux canaux, il y a le danger de court-circuiter des parties du circuit en cas de mesure de tension simultanée sur le deuxième canal.

La solution du problème est un petit amplificateur différentiel qui mesure une différence de potentiel à l'abri du mode commun. Ce n'est pas un problème pour ces amplificateurs capables de rejeter les tensions de mode commun jusqu'à une certaine valeur. La sortie est alors la tension différentielle rapportée au potentiel de la masse de l'oscilloscope. De cette manière, de faibles tensions aux bornes des résistances dans un circuit sont accessibles à la mesure et, dans certaines limites, indépendamment d'une mesure de tension simultanée.

L'avantage de ce concept est l'existence de circuits intégrés conçus pour ça. Il suffit de quelques composants supplémentaires pour obtenir la sonde de courant.

#### Caractéristiques

En raison de sa large bande passante soulignée par le fabricant, jusqu'à 6 MHz, nous avons choisi l'amplificateur d'instrumentation AD8421 d'Analog Devices. À moins de 10 €, cette puce est non seulement peu coûteuse, mais convainc également par son faible niveau de bruit, sa faible consommation d'énergie et son rejet élevé du mode commun. Les caractéristiques détaillées se trouvent

Le «2.0» du titre l'indique : ceci n'est pas la première sonde de l'auteur. La **fig. 1** montre le prototype de la sonde d'Alfred Rosenkränzer, publiée dans Elektor il y a quatre ans [1], mais qui traîne loin derrière celle présentée ici en termes de largeur de bande. La motivation de ce nouveau projet est donc évidente : cette sonde version 2.0 constitue un net progrès par rapport à la précédente dont la bande passante était limitée à 130 kHz. Ce gain se paie par une réduction de l'amplitude du mode commun acceptable sur les entrées, mais voyez vous-même !

dans l'encadré «AD8421 - Caractéristiques techniques», et plus encore dans la fiche technique du fabricant [2].

Malheureusement, l'AD8421 présente également un inconvénient majeur par rapport à la puce AD8479 utilisée dans la première version : alors que dans celle-ci, la puce avait une plage de mode commun de  $\pm 200$  à  $600$  V, les entrées de l'AD8421 utilisées ici doivent rester dans la plage de sa tension d'alimentation. Une tension d'alimentation de  $\pm 15$  V donne donc une plage de mode commun utilisable d'environ  $\pm 12$  V. À première vue, c'est peu, mais la puce qui coche toutes les cases reste à inventer. Il faudra donc choisir l'une ou l'autre version de la sonde, la 1.0 de 2016, pour les applications à tension d'alimentation élevée, et la 2.0 pour les signaux rapides et une basse tension d'alimentation. C'est la situation qui dictera le choix du bon outil.

## Schéma de la sonde

Le concept d'Alfred Rosenkränzer a convaincu Elektor. Ton Giesberts, du labo d'Elektor, a donc repris son idée et l'a légèrement retravaillée. Le circuit résultant de la **fig. 2** est configuré pour un gain de 2, fixé par R5, une résistance unique. Le gain s'obtient par l'équation suivante :

$$A = 1 + (9.9 \text{ k}\Omega / R_5)$$

Si l'on omet R5, la fiche technique indique un gain unitaire avec une largeur de bande de 10 MHz, puisque R5 est pratiquement infini dans ce cas. Avec la valeur choisie de 10 k $\Omega$  pour R5, on obtient un gain d'exactement 1,99, soit une erreur de 0,5 % par rapport au gain de 2, ce qui est plus précis que les résistances utilisées. La largeur de bande à ce gain dépasse 6 MHz – mesurée, elle était même d'environ 8 MHz. Si vous préférez d'autres gains : même avec un gain de 100, la largeur de bande de l'AD8421 atteint encore 2 MHz ! Les filtres d'entrée (R1/C1 et R2/C2) offrent une protection simple contre les surtensions et les transitoires pour les conditions de surcharge de courte durée. De plus, ils corrige la légère augmentation du gain de l'AD8421 près de la fréquence de coupure, ce qui permet de linéariser la réponse en fréquence de la sonde.

Bien que l'AD8421 ait des entrées très robustes, les surtensions plus longues doivent être évitées. Répétons que la plage utilisable de mode commun sur les entrées est limitée par l'alimentation de  $\pm 15$  V à un peu plus de  $\pm 12$  V.

La sonde possède ses propres régulateurs de tension ainsi qu'un filtre CEM avec C13, C14 et la self en mode commun L1 pour supprimer

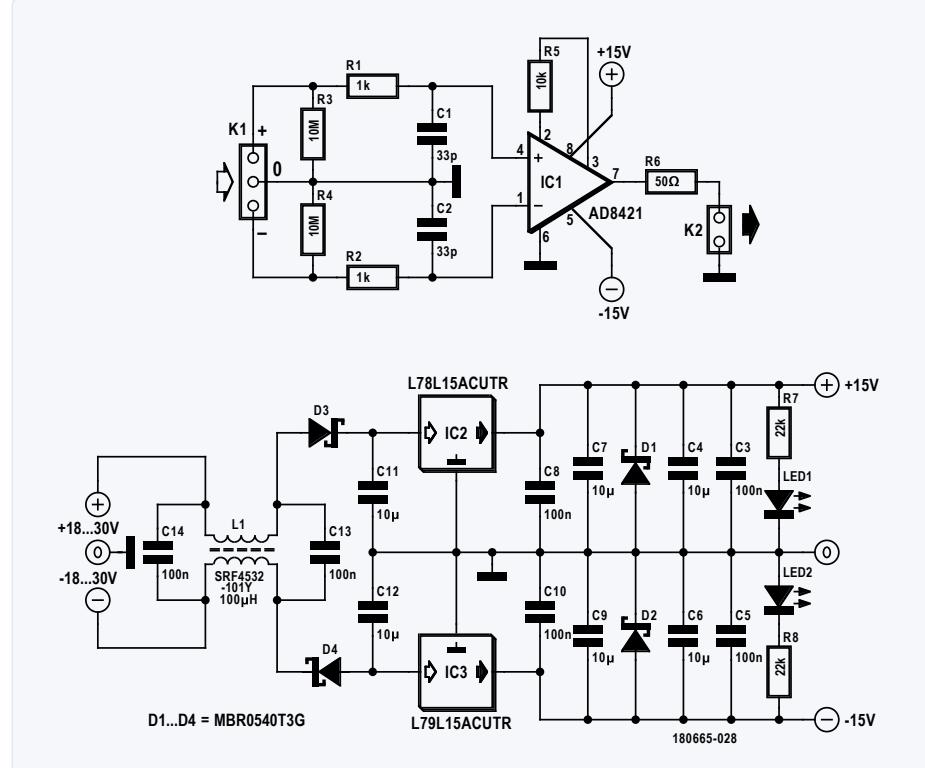


Figure 2. Circuit complet de la sonde 2.0. Ici on ne laisse pas sur les moyens pour obtenir des tensions d'alimentation propres !

les éventuels parasites de l'alimentation utilisée pour la sonde - ce qui est important si la sonde doit être alimentée par une alimentation à découpage. Pour un usage occasionnel, elle peut être alimentée par une alimentation électrique symétrique de laboratoire ou mieux, par une petite alimentation électrique propre. D'ailleurs, D3 et D4 ne sont pas destinés à redresser une tension alternative, mais à protéger contre une inversion de polarité ! Les LED1 et LED2 indiquent que les deux tensions d'alimentation sont présentes et que la sonde est active. Pour éviter de vous éblouir, leurs résistances série R7 et R8 ont une valeur élevée. Les deux résistances R3 et R4 de 10 M $\Omega$  servent à mettre les entrées ouvertes au potentiel de la masse, ce qui garantit que la sortie de la puce fournit alors 0 V. Il en résulte également une impédance d'entrée élevée et définie. La résistance R6 de 50  $\Omega$  est nécessaire pour l'adaptation à un câble coaxial, car la sortie de IC1 est à faible impédance.

## Alimentation

Comme il ne circule que de très faibles courants, un transformateur de 1,5 VA avec 2 x 12 V ou 2 x 15 V au secondaire, un redresseur double alternance et deux condensateurs de filtrage de 22  $\mu$ F / 35 V chacun sont

## CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DE L'AD8421

### Alimentation :

$\pm 2,5 \dots \pm 18$  V

### Consommation de courant :

2,3 mA max

### Bruit :

max. 3,2 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 kHz  
max. 200 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$  @ 1 kHz

### Bandé passante :

10 MHz @ gain = 1  
2 MHz @ gain = 100

### CMRR :

94 dB @ DC, gain = 1  
80 dB @ 20 kHz, gain = 1

### Vitesse de montée :

35 V/ $\mu$ s

### Dérive :

0,2  $\mu$ V/ $^{\circ}$ C

### Tension de décalage d'entrée :

1 ppm/ $^{\circ}$ C de l'amplification @ facteur 1

### Protection d'entrée :

max. 40 V entre « +IN » et « -VS »  
max. 40 V entre « -IN » et « +VS »

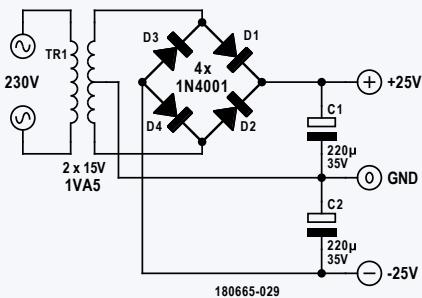


Figure 3. Circuit d'une simple alimentation électrique comprenant un transformateur, un redressement double alternance et des condensateurs de filtrage.

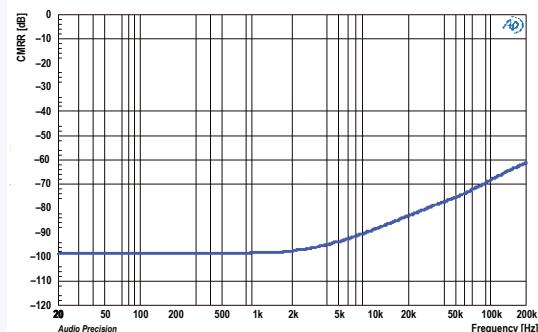


Figure 4. Le rejet de mode commun en fonction de la fréquence.

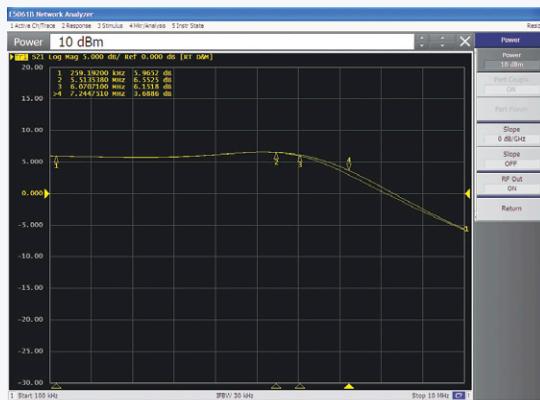


Figure 5. La réponse en fréquence de la sonde atteint 8 MHz.

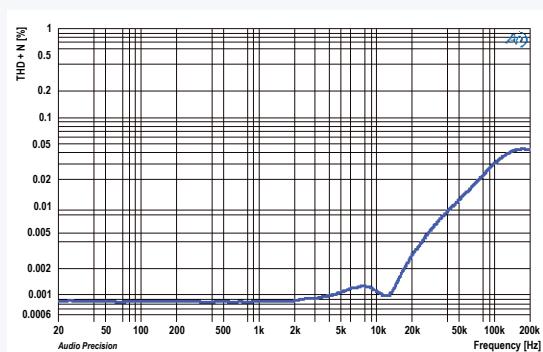


Figure 6. La distorsion augmente fortement au-dessus de 10 kHz, mais reste à un niveau très faible à 200 kHz.

suffisants (**fig. 3**). Les mesures n'ont montré aucune différence dans l'alimentation avec une alimentation aussi petite par rapport à une alimentation de laboratoire. L'ondulation résiduelle des tensions d'alimentation est assez faible à environ 200 mV<sub>CC</sub> en raison de la faible charge.

Les régulateurs de tension de 15 V utilisés peuvent supporter des tensions d'entrée de 17,5 à 35 V. À travers les deux diodes Schottky D3 et D4, la sonde peut donc être alimentée avec des tensions de  $\pm 18$  V. Pour TR1, un petit transformateur de 12 V de tension nominale peut suffire, car les petits transformateurs de faible puissance sont à haute impédance et leur tension à vide ou à faible charge est nettement plus élevée. Même après avoir déduit la perte de tension de  $\pm 0,7$  V à travers D1 à D4, on a souvent jusqu'à  $\pm 20$  V à la sortie de l'alimentation. Il vaut mieux le vérifier par une mesure. Par contre, avec un petit transformateur de 18 V on peut, dans certaines

conditions, se retrouver avec plus de  $\pm 35$  V à la sortie, ce qu'il faut absolument éviter. Avec un petit transformateur de 15 V, attendez-vous à environ  $\pm 26$  V à la sortie.

Des tests ont été effectués pour déterminer le comportement avec une tension d'alimentation réduite. Un signal d'entrée de 1 kHz avec une amplitude de 3 V<sub>CC</sub> a été utilisé, ce qui, avec le gain de 2, a donné 6 V<sub>CC</sub> à la sortie. La petite alimentation était connectée à un transformateur variable et sa tension d'entrée a été progressivement réduite. Tant que la tension d'alimentation fournie par la source d'alimentation restait supérieure à  $\pm 12$  V, on n'a observé aucun changement, mais en dessous de cette valeur, le signal à la sortie de la sonde commençait à faiblir. Rien d'étonnant, car avec les 2 V de chute de tension à travers D3 et D4 et les régulateurs, il ne reste guère de marge sur la sortie de IC1. Le fait que même à juste un peu plus de  $\pm 12$  V, il n'y ait pas eu de perturbation, alors que les

deux régulateurs de tension avaient cessé de réguler, prouve l'excellente suppression des effets de la tension d'alimentation de l'AD8421 ( $\geq 100$  dB @ 100 Hz).

## Mesures

Pour un signal de 1 kHz avec 3 V<sub>CC</sub> aux deux entrées, la réjection de mode commun est supérieure à 98 dB. À partir de 2 kHz, elle diminue régulièrement jusqu'à 61 dB à 200 kHz (**fig. 4**). C'est mieux que prévu, bien que les composants du filtre d'entrée constitué de R1/C2 et R2/C2 ne soient pas identiques malgré une tolérance étroite.

Une mesure asymétrique avec un générateur de fonctions sur une entrée (l'autre étant mise à la masse) a donné une largeur de bande réelle d'environ 8 MHz (par rapport à 1 kHz). Lorsque le gain est réglé à un niveau bas avec R5, on observe une légère augmentation du gain près de la fréquence de coupure, la valeur maximale étant de 7 MHz (**fig. 5**).



Figure 7. Câble coaxial RG316 avec extrémité dénudée et connecteur serti à l'autre extrémité.

Les filtres d'entrée ont une fréquence de coupure de 4,8 MHz (sans tenir compte de l'impédance de la source), ce qui compensate cette augmentation responsable du fait que la largeur de bande de la sonde est plus élevée que prévu. Cependant, à 8 MHz, le déphasage du signal de sortie est supérieur à 180°. Les ondes sinusoïdales dans la gamme des MHz sont plutôt triangulaires. La distorsion augmente progressivement pour les signaux supérieurs à 10 kHz (**fig. 6**).

## Câbles

Un câble coaxial RG316, disponible au mètre, peut être utilisé pour connecter la sortie. Cependant, le raccordement d'un connecteur BNC à l'autre extrémité nécessite un outil à sertir adéquat. S'il n'est pas disponible, vous pouvez simplement acheter un câble coaxial BNC complet, couper un connecteur à une extrémité, le dénuder (**fig. 7**) et souder le câble sur la carte. Prenez un câble BNC long, coupez-le en son milieu, vous aurez deux câbles pour deux sondes.

Pour le soudage direct du câble RG316, la carte comporte en son milieu de grandes pastilles idoines (**fig. 8**), auxquelles le conducteur central et le blindage peuvent être soudés. Les fils pour l'alimentation électrique peuvent être soudés sur les trois pastilles en haut à droite. Les cinq plaquettes ont des trous qui accepteraient également des picots de 1,3 mm. Il faudra raccourcir un peu ces picots, afin que la carte tienne dans le coffret recommandé. Avec un petit serre-câbles passant par les trous de 2,5 mm tout à fait à droite, on peut fixer tous les fils sortant de la sonde (**fig. 9**). La colle chaude peut rendre de bons services ici. Toutefois, avant de brancher les câbles, veuillez lire d'abord la section sur les instructions de montage ci-dessous.

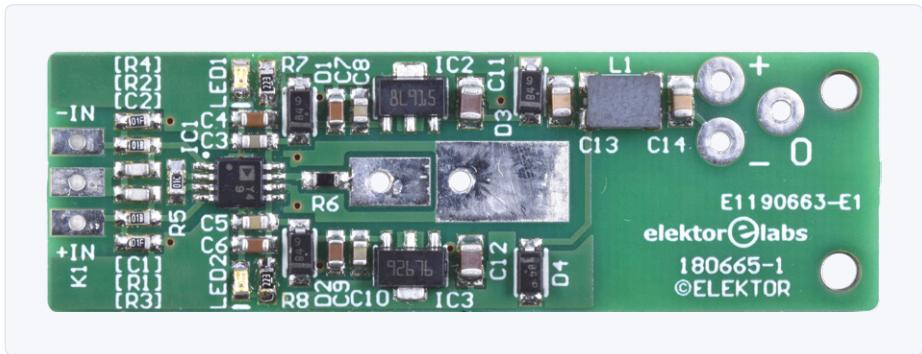


Figure 8. La carte du prototype entièrement équipée. Pour souder les CMS 0603, il faut une main ferme.

Comme «prise» pour les cordons de test, le plus simple est de souder, à plat sur les trois pastilles du côté gauche de la carte (fig. 8), une section de 3 pattes d'un support SIL, en raison de la qualité de ses contacts tournés. La fig. 9 montre l'aspect du montage terminé.

## Instructions de montage

Un coffret approprié est spécifié dans la liste des composants. On commence par percer sur le côté gauche du coffret un trou rectangulaire approprié pour le connecteur SIL tripo-

laire, puis on introduit la carte entièrement assemblée et testée dans le coffret, on glisse la prise SIL triolaire par la gauche à travers la fente sur la carte et on la soude. C'est maintenant au tour du câble coaxial. Utilisez de préférence du câble RG316. Le connecteur BNC doit être adapté au RG316 ! Il existe de nombreuses variantes de BNC pour différents câbles. Veuillez vous référer à la nomenclature. Le câble utilisé dans le prototype a un diamètre extérieur de 2,9 mm. Si c'est votre première prise BNC, vous devriez

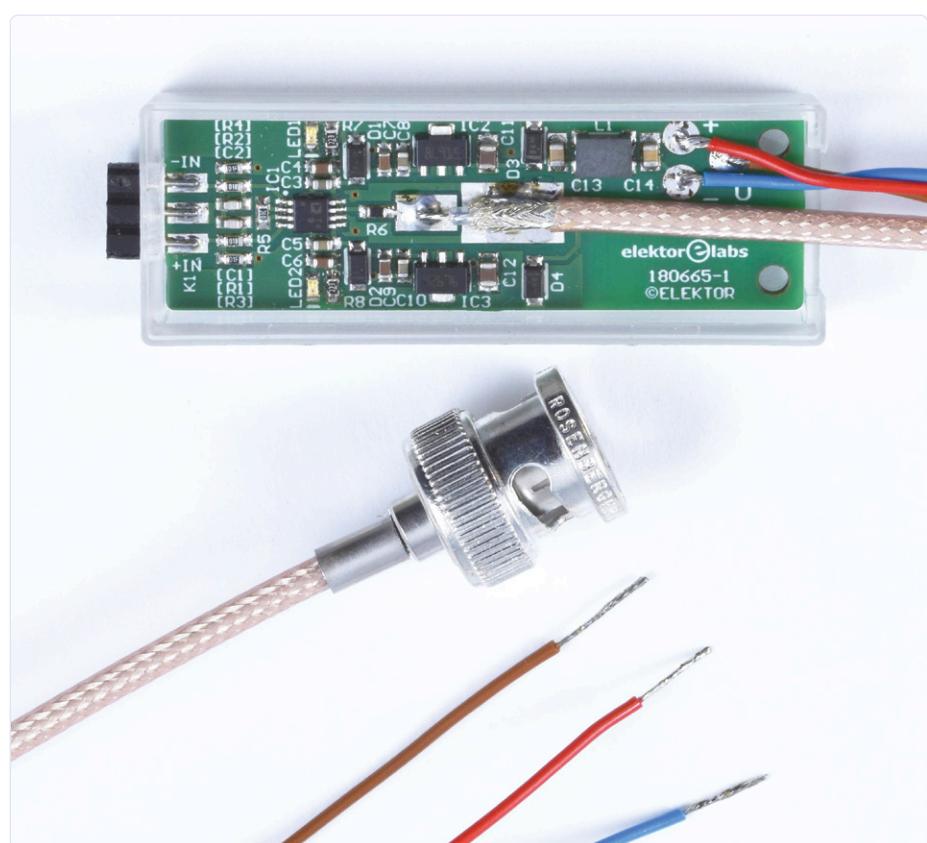


Figure 9. Prototype dans son coffret avec câbles soudés et prise SIL.



## LISTE DES COMPOSANTS

### Résistances :

(toutes 1%, 100 mW, SMD 0603)

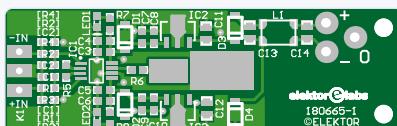
R1,R2 = 1 kΩ

R3,R4 = 10 MΩ

R5 = 10 kΩ

R6 = 50 Ω

R7,R8 = 22 kΩ



Le côté composants du circuit imprimé conçu au labo Elektor.

### Condensateurs :

C1,C2 = 33 p / 50 V, 1%, C0G/NP0, SMD 0603

C3,C5,C8,C10 = 100 n / 50 V, 10%, X7R, SMD 0603

C4,C6,C7,C9 = 10 μ / 25 V, 20%, X5R, SMD 0603

C11,C12 = 10 μ / 35 V, 10%, X5R, SMD 0805

C13,C14 = 100 n / 100 V, 10%, X7R, SMD 0805

### Bobine :

L1 = 100 μH @ 100 kHz, self de choc, 200 mA, SMD, p. ex. SRF4532-101Y, Bourns

### Semi-conducteurs :

IC1 = AD8421ARMZ, MSOP 8

IC2 = L78L15ACUTR, SOT-89

IC3 = L79L15ACUTR, SOT-89

LED1,LED2 = LED, rouge, SMD 0603

D1..D4 = MBR0540T3G, SOD-123

### Divers :

K1 = Prise SIL 3 broches, verticale, RM 1/10

Prise SIL 3 broches comme fiche pour les câbles de mesure\*

Câble coaxial RG316, 50 Ω, ø 2,9 mm, 1 m, p. ex. Conrad 606450\*

Connecteur à sertir BNC pour RG316, 50 Ω, p. ex. Conrad 1490723\*

Boîtier USB1KL, 56x20x12 mm, p. ex. Conrad 531276\*

Autre boîtier : TC-USB1KL203, 56x20x12 mm

Circuit imprimé n° 180665-1 v1.0\*

\* voir le texte

consulter le site du fabricant pour savoir comment dénuder correctement le câble avant de le fixer.

Pour souder le câble coaxial aux pastilles sur la carte, il faut d'abord dénuder 12 mm de la gaine. Ensuite, raccourcissez la tresse de blindage à 6 mm. Enlevez maintenant 4 mm de l'isolation du conducteur central. Le brin du conducteur central se trouve alors à 2 mm du blindage tressé. Soudez d'abord le conducteur central, puis le blindage. Avec ce dernier, vous devrez travailler rapidement. La fig. 9 montre à quoi doit ressembler la connexion soudée. Maintenant, c'est le tour des trois fils multi-brins de l'alimentation. Il ne manque plus que les conducteurs de mesure. Pour cela, on soude trois brins fins à un connecteur SIL à trois broches. Sur le prototype, nous avons soudé deux fils fins de cuivre émaillé à une embase SIL (fig. 10). Le couvercle peut maintenant être mis en place et la sonde est prête à l'emploi.

### Mesures

L'alimentation de la sonde doit être isolée galvaniquement du circuit testé – il est donc préférable d'utiliser une petite alimentation propre à la sonde comme celle de la fig. 3. Lors de la mesure, il est impératif de relier la masse de l'entrée à la masse du circuit ! Les points de mesure peuvent avoir une tension de mode commun jusqu'à ±12 V par rapport à la masse – mais pas plus.

Pour la connexion des fils de mesure : la durée de vie mécanique des broches SIL tournées est généralement de quelques centaines d'embrochages. Elles devraient donc pouvoir servir pendant des années. Si nécessaire, la prise soudée à la carte peut être facilement remplacée, car ses broches ne sont pas enfichées dans des trous mais soudées à plat sur les pastilles.

Au lieu d'utiliser la patte centrale de cette prise comme masse, vous pouvez aussi simplement connecter la pastille «0» de la carte à la masse

## MESURES SUR LE PROTOTYPE

Tension d'alimentation avec le bloc d'alimentation selon la fig. 3 (transfo 12 V) : ±18,9 V. La consommation par branche était de 5 à 6 mA. Les régulateurs de tension et les LED se taillent la part du lion.

### Valeurs maximales pour un signal de 1 kHz de 4,8 V<sub>cc</sub> :

U<sub>out</sub> : 9,52 V @ charge = 100 kΩ

THD+N : 0,1%,

### Valeurs typiques pour un signal de 1 kHz de 3 V<sub>cc</sub> :

U<sub>out</sub> : 5,97 V @ charge = entrée de l'oscilloscope

THD+N 0,00025 % @ B = 22 kHz

0,00083 % @ B > 500 kHz

### Rejet du mode commun à 3 V<sub>cc</sub> sur les deux entrées

CMRR : >98 dB @ 20...1.000 Hz

>60 dB @ 200 kHz

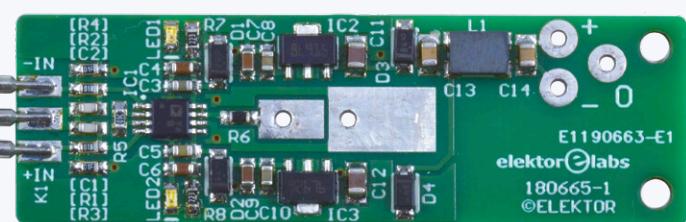
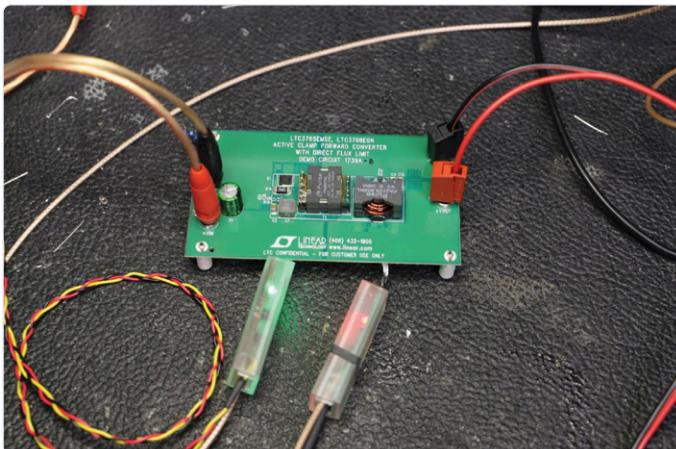
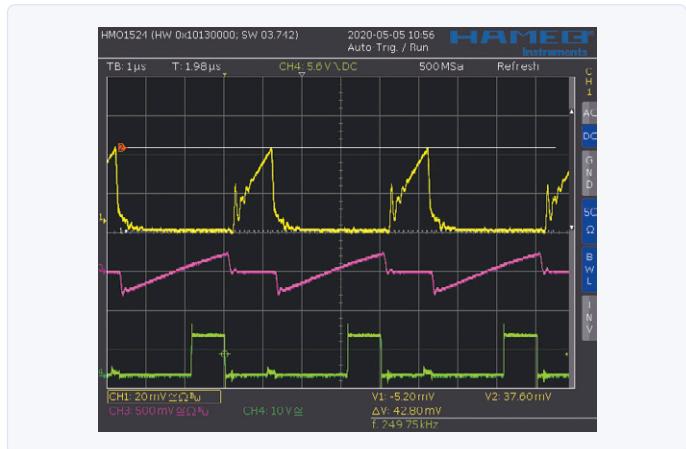


Figure 10. À titre d'essai, deux minces fils de cuivre émaillé, utilisés comme fils de mesure, ont été soudés à une prise SIL à trois pattes et embrochés. La masse doit alors être connectée ailleurs.



*Figure 11. Alfred Rosenkränzer utilise deux sondes sur une carte de régulation à découpage.*



*Figure 12. La sonde 2.0 peut également mesurer des variations rapides de courant.*

du circuit à mesurer. Grâce à la forte réjection de mode commun de la sonde, il est peu probable que cela entraîne des interférences, du bruit ou des parasites.

Lorsque vous utilisez plusieurs sondes alimentées par la même alimentation, vous ne pouvez bien sûr établir qu'une connexion à la masse du circuit à mesurer – sinon vous créeriez une vilaine boucle de masse.

Important : si la tension d'alimentation du

circuit étudié est de plus de 12 V, avant de raccorder les câbles de mesure à une résistance shunt, il faut d'abord vérifier avec un multimètre si la tension à ses bornes reste dans la plage de mode commun de  $\pm 12$  V.

La **fig. 11** montre l'utilisation de deux sondes sur le circuit d'un petit régulateur à découpage. La **fig. 12** prouve que cette sonde peut mesurer des variations très rapides de l'intensité du courant.

Comme toujours, sur le site d'Elektor [3], vous pouvez télécharger gratuitement les fichiers de conception de la carte présentée dans cet article. 

180665-03

**Votre avis, s'il vous plaît...**

Vous pouvez vous adresser à l'auteur en allemand ou en anglais :  
[alfred\\_rosenkraenzer@qmx.de](mailto:alfred_rosenkraenzer@qmx.de)



# Dans l'e-choppe d'Elektor

- **Pince de courant PeakTech 4350**  
[www.elektor.fr/peaktech-4350-clamp-meter](http://www.elektor.fr/peaktech-4350-clamp-meter)
  - **Convertisseur de courant pour oscilloscopes (150170-1)**  
[www.elektor.fr/potentialfreie-strommessung-fur-oszilloskope](http://www.elektor.fr/potentialfreie-strommessung-fur-oszilloskope)
  - **Oscilloscope numéro à 2 voies OWON SDS1102 DSO (100 MHz)**  
[www.elektor.fr/owon-sds1102-2-ch-digital-oscilloscope-100-mhz](http://www.elektor.fr/owon-sds1102-2-ch-digital-oscilloscope-100-mhz)

## Ont contribué à cet article :

Idée et circuit : **Alfred Rosenkränzer**

Révision et texte : **Ton Giesberts**

Schémas : **Patrick Wielders**

Rédaction : Thomas Scherer

Traduction : Helmut Müller

Maquette : Giel Dols

LIENS

- [1] Article «Sonde de courant pour oscilloscopes», A. Rosenkränzer, Elektor juillet-août 2016 : [www.elektormagazine.fr/magazine-elektor-201607/29098](http://www.elektormagazine.fr/magazine-elektor-201607/29098)
  - [2] Fiche technique de l'AD8421 : [www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8421.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8421.pdf)
  - [3] Page de cet article : [www.elektormagazine.fr/180665-03](http://www.elektormagazine.fr/180665-03)
  - [4] Page de ce projet sur Elektor Labs : [www.elektormagazine.fr/labs/differential-current-probe-180665](http://www.elektormagazine.fr/labs/differential-current-probe-180665)