

Ergänzung zum Beitrag in FA 5/21, S. 364 ff. „Wechselstrommessung – potenzialfrei über sechs Dekaden“

Mit einem Oszilloskop Owon SDS8302 wurde der Frequenzgang des Rauschens am Ausgang A1 gemessen. Das Oszilloskop arbeitete in der Betriebsart FFT. Außerdem war *Display Persist Infinite* aktiviert, um durch Aufsummieren über einige Minuten genügend glatte Verläufe zu erhalten. Für Bild A1 und A2 war zusätzlich ein Nachverstärker mit wählbarer oberer Grenzfrequenz (Steilheit 18 dB/Oktave) zwischen Ausgang A1 und Oszilloskop geschaltet, um Fehler durch Aliasing zu vermeiden.

Bild A1, das den mittelfrequenten Bereich abbildet, lässt ungefähr weißes Rauschen erkennen. Dessen Dichte wurde zuvor gemessen, wie im Beitrag erwähnt, und entspricht etwa $2 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ am Eingang E1. Multipliziert mit der Sekundärwindungszahl $N_s = 2500$ des Stromwandlers ergibt sich $5 \text{ nA}/\sqrt{\text{Hz}}$, bezogen auf den zu messenden Wechselstrom. Bei 1 Hz Messbandbreite, erreichbar durch ein Selektivvoltmeter, ein Zweiphasen-Lock-in-Voltmeter oder eine hochauflösende FFT, könnte theoretisch ein Strom mit 5 nA Effektivwert, der durch die Öffnung des Stromwandlers fließt, mit $\text{SNR} = 1$ gemessen werden. Oberhalb etwa 100 kHz steigt die Rauschdichte an, wie Bild A2 zeigt. In Bild A3 ist ein ausgeprägtes Maximum bei 700 kHz zu sehen. Die Frequenz ist die gleiche wie bei der in Bild 14 des Beitrags erkennbaren gedämpften Schwingung nach den Rechteckflanken.

Diese Rauschanhebung ist für einen Teil des am Ausgang A1 auftretenden Breitbandrauschens von 15 mV (Spitze-Spitze-Wert) verantwortlich. Beim Nachbau des Geräts könnten für IC1 eine Steckfassung eingelötet und statt des OP-37 ersatzweise der Typ OP-27 bzw. OPA27 probiert werden, der aufgrund seiner internen Frequenzkompensation für $V = 1$ geeignet ist und voraussichtlich weniger Überschwängen und Rauschanhebung produziert, eventuell zu Lasten der erreichbaren Bandbreite.

Die auf der nächsten Seite folgenden Bilder wurden mit Hilfe verschiedener Lastwiderstände unterschiedlich große Ströme aus dem 230-V-Netz durch die Öffnung des Stromwandlers geführt und die 50-Hz-Ausgangsspannungen an den Ausgängen A1 bis A4 gleichzeitig mit den Oszilloskopkanälen 1 bis 4 beobachtet. Zur Kontrolle der Istwerte war ein Digitalmultimeter in den Stromkreis geschaltet.

Bild A1:
Rauschspektrum im
Frequenzbereich von
0 Hz bis 28 kHz

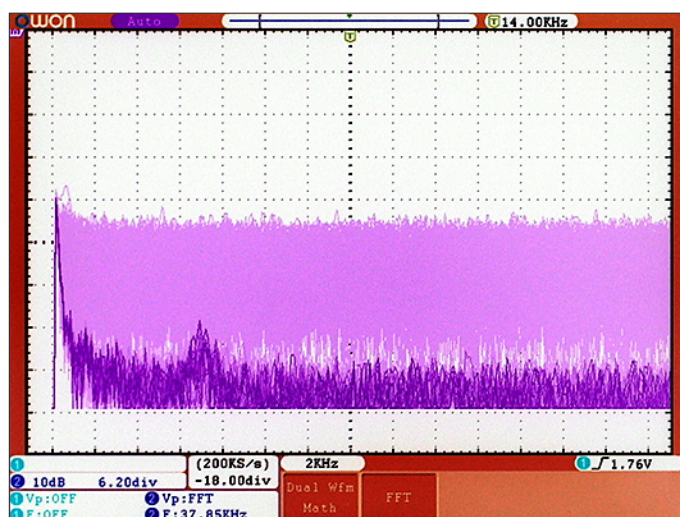


Bild A2:
Rauschspektrum im
Frequenzbereich von
0 Hz bis 350 kHz

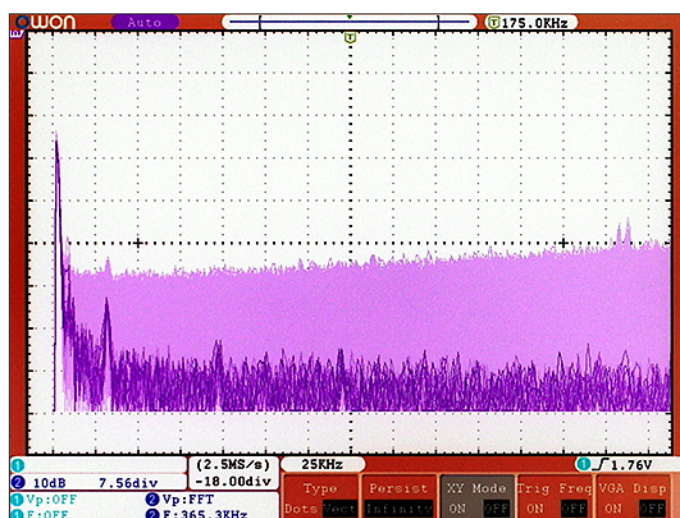
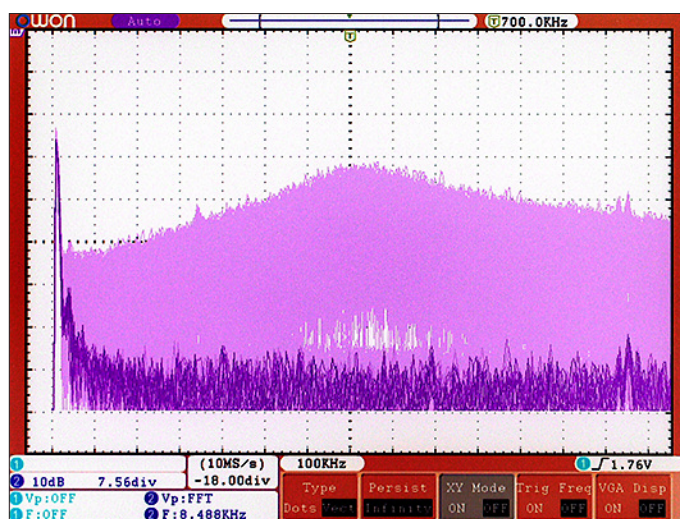


Bild A3:
Rauschspektrum im
Frequenzbereich von
0 Hz bis 1,4 MHz



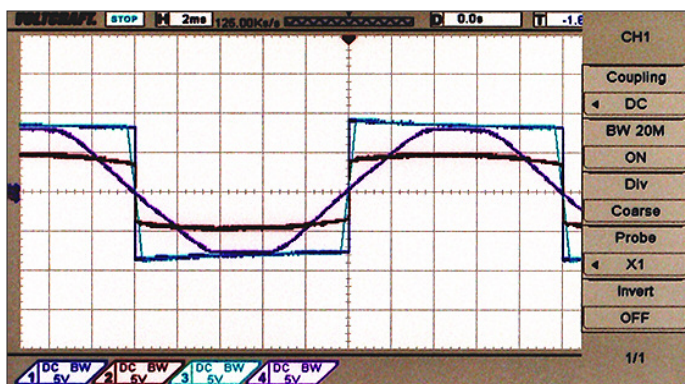


Bild A4:
Primärstrom 57,4 A

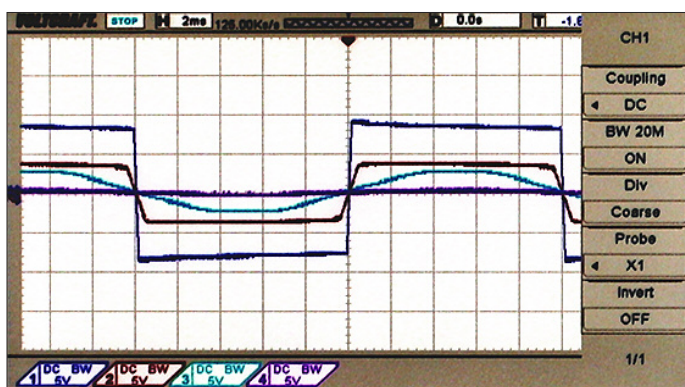


Bild A5:
Primärstrom 1,91 A

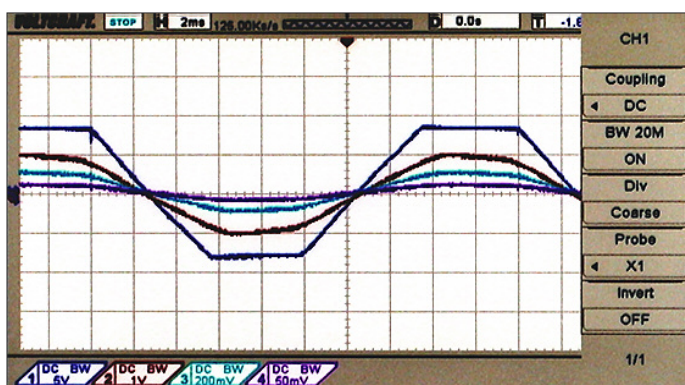


Bild A6:
Primärstrom 73 mA

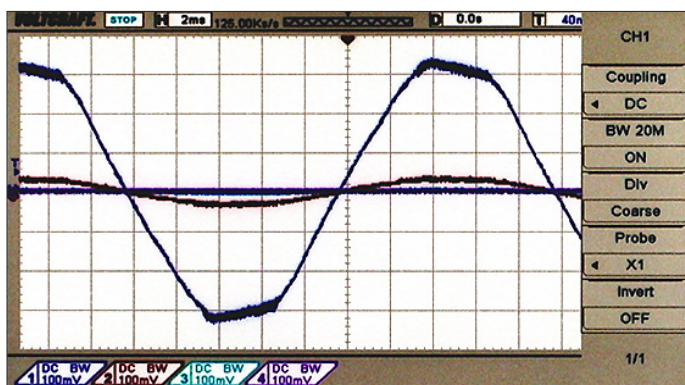


Bild A7:
Primärstrom 2,3 mA

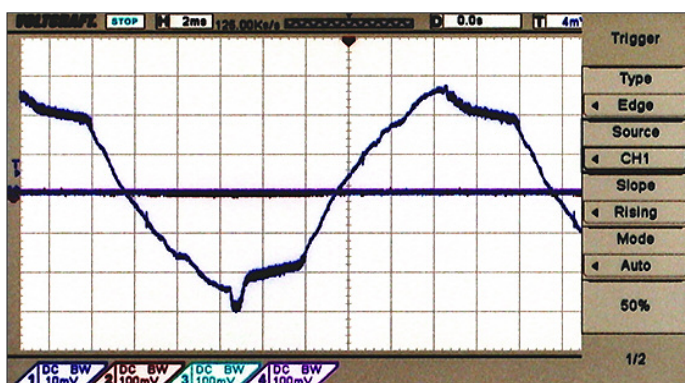


Bild A8:
Primärstrom 150 μ A

Bild A4: Hier flossen 9,56 A durch einen isolierten Draht, der sechsfach durch den Stromwandler gefädelt war ($N_p = 6$ Wdg.), und erzeugten einen äquivalenten Strom von 57,4 A. Hinweis: Die Messdauer war auf wenige Sekunden beschränkt. Wegen der nicht gerade VDE-gerechten Umstände ist dieser Test nicht zur Nachahmung empfohlen! Die auf gleiche Empfindlichkeit von 5 V/Div. geschalteten Oszilloskopkanäle zeigen an, dass die Ausgänge A1 bis A3 erwartungsgemäß völlig übersteuert sind.

Bei den Ausgängen A1 und A3 erfolgt die Begrenzung bei ± 8 V bis ± 9 V, denn die zur Versorgung der Elektronik eingesetzten 9-V-Batterien waren ganz frisch. Beim Ausgang A2 ist der (absichtliche) begrenzte Einfluss der LEDs D3 bis D6 erkennbar, vergleiche Erläuterungen im Beitrag. Erst der Ausgang A4 mit seinem geringeren Wandlungsfaktor von 0,1 V/A liefert ein auswertbares Signal kurz vor der Übersteuerungsgrenze. Hier würde man gegebenenfalls zur Auslesung von Ausgang A5 wechseln.

Bild A5: Bei 1,91 A Wechselstrom – ab jetzt mit $N_p = 1$ Wdg., d.h. der Draht war nur einmal durch den Stromwandler geführt – sind die Ausgänge A1 und A2 noch übersteuert, an Ausgang A3 ist ein Signal mit der erwarteten Amplitude abnehmbar. 1,91 A Effektivwert, entsprechend $\pm 2,7$ A Spitzenwert bei Sinusform, sollten $\pm 2,7$ V an Ausgang A3 erzeugen. Das zehnfach kleinere Signal an Ausgang A4 kann bei Bedarf noch zur Plausibilitätskontrolle genutzt werden.

In Bild A6, mit geänderten Oszilloskop-Empfindlichkeiten, ist der Fluss von 73 mA Wechselstrom abgebildet. Ausgang A1 ist weiterhin übersteuert. Jetzt ist Ausgang A2 (mit 10 V/A) am besten auswertbar und zeigt die passenden 0,73 V Effektivwert bzw. ± 1 V Spitzenwert.

Bei 2,3 mA Strom, wie in Bild A7 zu sehen, liefert Ausgang A1 (mit 100 V/A) eine plausible und gut auswertbare Spitze-Spitze-Amplitude von 650 mV. Die Abweichung von der Sinusform ist typisch für Netzspannungs- bzw. -stromverläufe.

Bild A8 zeigt, dass auch solch geringe Ströme wie 150 μ A (0,0003 % des Wandler-Nennstroms) am Ausgang A1 noch eine Spannung mit gutem Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) erzeugen. Die Ausgänge A2 bis A5 sind jetzt nutzlos geworden.

Ohne Stromfluss ($I_p = 0 \mu$ A) kommt das in Bild A9 auf der nächsten Seite erkennbare Signal an Ausgang A1 zustande. Durch Parallelschalten eines kleinen Kondensators zum Ausgang war das Breitbandrauschen hier gedämpft, sodass ein 50-Hz-Restbrum mit einem Spitze-Spitze-Wert von 2 mV zum Vorschein kam, entspre-

chend etwa $7\mu\text{A}$ Effektivwert des zu messenden Primärstroms. Die Signalamplitude ist etwas orts- und lageabhängig. Ursache sind magnetische Einstreuungen auf den Kern des Stromwandlers. Als Quelle kommen stromdurchflossene Netzleitungen, Transformatoren und Ähnliches in Betracht.

Abschließend erfolgte noch die messtechnische Verfolgung von Entladevorgängen an Kondensatoren mithilfe des beschriebenen Weitbereichs-Stromwandlers. Die zum Entladen verwendete isolierte 6-mm²-Litze von 25 cm Länge war durch die Messöffnung des Geräts geführt. Das Oszilloskop arbeitete in der Triggerbetriebsart *Single Shot*, als Triggersignal diente das Messsignal selbst.

Bild A10: Drei MKT-Kondensatoren von je $10\mu\text{F}$ waren parallelgeschaltet und auf +40 V geladen. Die Auswertung des Ausgangs A5 erfolgte mit 0,01 V/A Empfindlichkeit. Die bei Kurzschluss gemessene Impulshöhe von +2,5 V entspricht also 250 A Spitzenstrom. Die Flankensteilheit wird nicht von der begrenzten Bandbreite des Geräts verursacht – diese beträgt etwa 500 kHz, vergleiche Beitrag – sondern von der Induktivität des Drahtes und der parasitären Induktivität ESL der Kondensatoren.

Bild A11: Wieder dreimal $10\mu\text{F}$, geladen auf 40 V, und in den Entladekreis jetzt zusätzlich einen 1- Ω -Widerstand eingefügt. Rechnerisch zu erwarten wäre ein Spitzenstrom von $40\text{ V}/1\Omega = 40\text{ A}$, der danach gemäß $e^{-t/\tau}$ abfällt, mit einer Zeitkonstante von $\tau = 30\mu\text{F} \cdot 1\Omega = 30\mu\text{s}$. Das Messsignal, diesmal am Ausgang A4 mit 0,1 V/A Empfindlichkeit ausgelesen, entspricht dem in guter Näherung.

Die Steilheit des Anstiegs ist jetzt deutlich höher als in Bild A10. An der Induktivität im Entladekreis hat sich nichts geändert, jedoch ist durch den Reihenwiderstand von 1 Ω die geschwindigkeitsreduzierende induktive Zeitkonstante $\tau = L_{\text{Draht}}/R$ viel kleiner geworden. Durch die so ermöglichte steile Anstiegsflanke wird der rechnerische Spitzenstrom von 40 A beinahe erreicht.

Bild A12: Diesmal wurde nur ein 1- μF -MKT-Kondensator verwendet und auf +1 V aufgeladen. Das Entladen erfolgte durch eine Reihenschaltung aus 10 Ω , 1 mH und einem fußpunktseitigen 1- Ω -Widerstand. Der Spannungsabfall an den 1 Ω gelangte zwecks Kontrolle zum Oszilloskopkanal 1 (blau). Am Stromwandlergerät wurde der mit 100 V/A empfindlichste Ausgang A1 ausgelesen und auf Kanal 2 (rot) gegeben. Beide unabhängigen Messmethoden zeigen denselben Zeitverlauf mit 23 mA Spitzenstrom.

Die Frequenz der gedämpften Schwingung von etwa 5 kHz entspricht dem Re-

Bild A9:
Primärstrom 0 μA

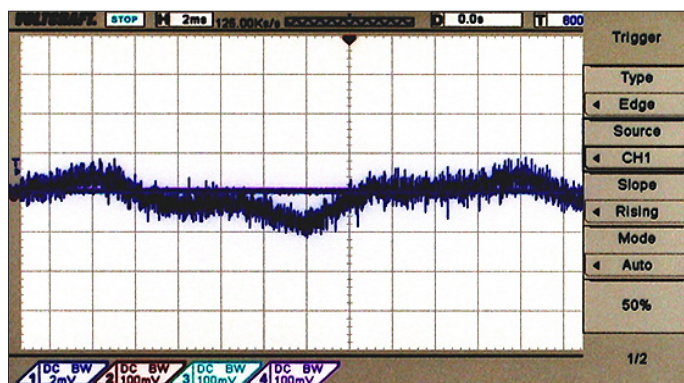


Bild A10:
250-A-Impuls

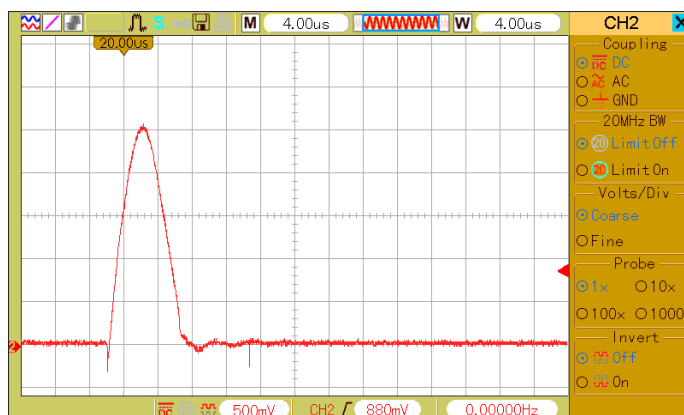


Bild A11:
38-A-Impuls

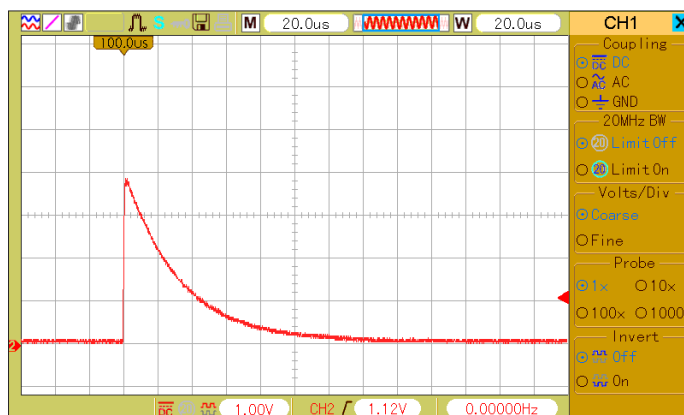
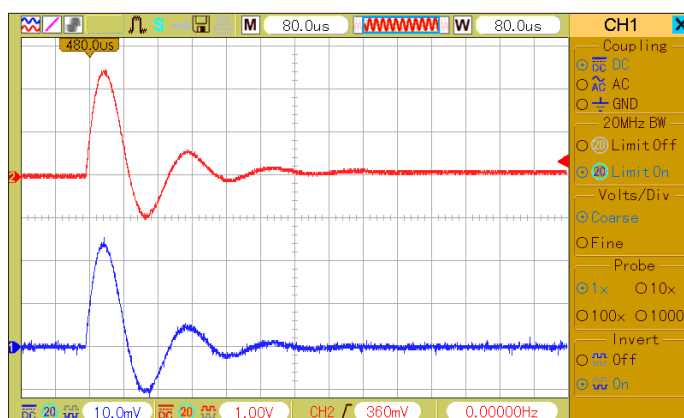


Bild A12:
23-mA-Impuls



chenwert, den die Thomsonsche Schwingungsgleichung für $1\mu\text{F}$ und 1mH liefert. Dass trotz des Reihenwiderstands von 11Ω eine Schwingung entsteht, ist wegen der Erfüllung der Ungleichung $R < 2 \cdot \sqrt{L/C}$ zu erwarten gewesen. Mit $R \geq 63\Omega$ würde man hier einen aperiodischen Entladevorgang erhalten.

Bild A13: Den auf $+1\text{V}$ aufgeladenen Kondensator nun über $10\text{k}\Omega$ entladen. Messung wieder am Ausgang A1 mit 100V/A . Zur Unterdrückung des Breitbandrauschens war direkt am Oszilloskop-eingang ein kleiner Kondensator mittels BNC-T-Stücks parallelgeschaltet. Der zu erwartende Spitzenstrom von $1\text{V}/10\text{k}\Omega = 100\mu\text{A}$ ist im Messsignal gut erkennbar, trotz der unruhigen Nulllinie, die durch magnetische Netzeinstreuungen zustandekommt.

Der Vergleich von Bild A10 und Bild A13 zeigt, dass ohne Umschaltvorgänge Ströme in einem Bereich von etwa $1:10^6$ erfassbar sind. Die simultane Nutzung von zwei der fünf Ausgänge ist in Bild A14 gezeigt: Einem 30-V-Netzteil, ausgangsseitig gepuffert mit zwei parallelgeschalteten Low-ESR-Elektrolytkondensatoren $470\mu\text{F}/50\text{V}$, ist ein Strombegrenzungsmodul nachgeschaltet, das auf $1,6\text{A}$ Maximalstrom eingestellt ist. Dessen Ausgang wurde über die oben erwähnte dicke Litze direkt mit Masse kurzgeschlossen und der dabei entstehende Verlauf des Ausgangsstromes mit zwei Oszilloskopkanälen beobachtet. Kanal 2 (rot) war mit dem Ausgang A5 des Stromwandlergeräts verbunden. Anhand dessen Empfindlichkeit von $0,01\text{V/A}$ erkennt man einen kurzzeitigen Spitzenstrom von bis zu 80A , den die Strombegrenzung für wenige Mikrosekunden passieren lässt und der sich beim Verbinden der Drähte nur in einem sehr kleinen Fünkchen bemerkbar macht, statt eines vernehmlichen Knallens, das ohne Strombegrenzung aufträte. Den Stromverlauf auch nach dem Peak noch gut aufgelöst verfolgen zu können, ermöglicht der Geräteausgang A3 mit 1V/A Empfindlichkeit, der an den Oszilloskopkanal 1 (blau) angeschlossen ist. Während des 80-A -Peaks ist dieser Kanal natürlich übersteuert, aber direkt danach zeigt er, wie die Strombegrenzung auf ihren Sollwert von $1,6\text{A}$ einschwingt.

Wie im Beitrag angedeutet, kann das verwendete Schaltungsprinzip – Einsatz mehrerer simultan arbeitender Kanäle mit unterschiedlichen Verstärkungen und Rauscheigenschaften – nach geeigneter Ergänzung auch für Gleichstrommessungen tauglich gemacht werden.

Bild A15 zeigt ein Versuchsmuster zur Erprobung der entsprechenden Schaltungsdetails. Wollte man dessen Eigenschaften, wie rausch- und offsetbegrenzte Messauf-

Bild A13:
100- μA -Impuls

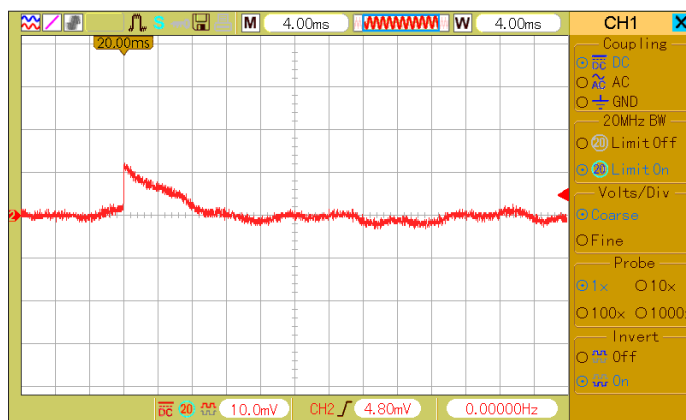
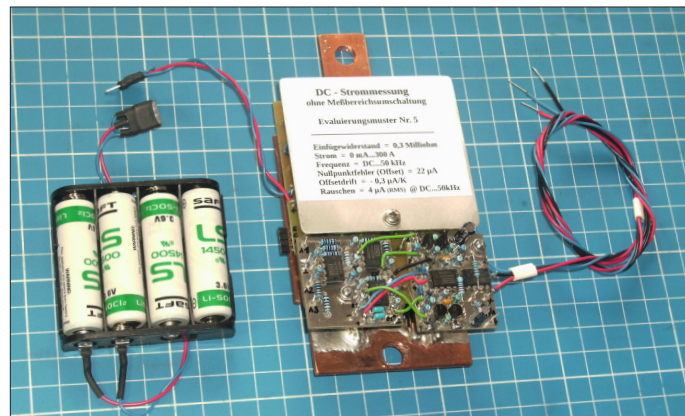


Bild A14:
Zwei Ausgänge
simultan



Bild A15:
Gleichstrom-
messung,
Versuchsmuster
Fotos, Screenshots:
Franke



lösung bzw. Dynaibereich mit herkömmlicher Messtechnik erreichen und dabei ohne Bereichsumschaltungen oder/und das notwendige Umstecken der Messleitung auskommen, so wäre ein Gleichstromverstärker mit einer Eingangsoffsetspannung von

$$U_{\text{EOff}} = 0,3\text{ m}\Omega \cdot 22\text{ }\mu\text{A} = 6,6\text{ nV},$$

einer Offsetdrift von 90 pV/K und einer Rauschspannungsdichte von $5,4\text{ pV}/\sqrt{\text{Hz}}$ nötig, wobei Nullpunktfehler und -driften infolge temperaturdifferenz-bedingter Thermospannungen immer noch auftreten würden.

emmmf@posteo.de