

# Anleitung Messen mit dem M1K (ADALM1000)

## *Einsatz des M1K als Oszilloskop, Arbiträrgenerator und SMU*

### 1 Die Messtechnik des M1K

Die ADALM1000 Messplatine von Analog Devices und wird meistens als "M1K" bezeichnet. "ADALM" steht für "Analog Devices Advanced Learning Modul".

Der M1K beinhaltet drei unterschiedliche Messfunktionen:

#### **Oszilloskop, Arbiträrgenerator sowie SMU.**

Die Kernkomponenten des M1K sind dessen AD- und DA-Wandler. Insofern kann man den M1K auch als DAQ (Data Acquisition Device) bezeichnen. Der M1K kann jedoch als Generator eine Last (z.B. eine Spule und ein Widerstand in Reihe) treiben und dabei gleichzeitig den momentan fließenden Strom zurück messen. Diese Funktionalität hat ein DAQ normalerweise nicht.

#### 1.1 Oszilloskop

Über die **Oszilloskopfunktion („HI-Z“-Modus)** werden an den zwei getrennten Kanälen CH A und CH B Spannungssignale am hochohmigen Eingang ( $1\text{ M}\Omega$ ) des M1K abgetastet, getriggert und vermessen wie bei einem normalen Bench Top Oszilloskop.

Die Abtastrate und Bandbreite des M1K sind jedoch nicht vergleichbar mit „normalen“ Bench Top Oszilloskopen: Das M1K bietet eine maximale Abtastrate von  $200\text{ kS/s}$  im Vergleich zu mindestens  $1\text{ GS/s}$  bei Bench Top Oszilloskopen.

Wie bei allen Oszilloskopen auch wird beim M1K das Signal über einen AD-Wandler abgetastet. Der AD-Wandler des M1K kann wegen der geringen Samplingrate mit einer sehr hohen Auflösung von 16 Bit betrieben werden. Im Vergleich dazu haben „normale Oszilloskope“ nur eine Auflösung von üblich 8 Bit. Dadurch kann der M1K auch auf einen üblichen einstellbaren Vorverstärker verzichten.

Leider kann der M1K aufgrund des Full Scale Range des AD-Wandlers direkt nur (positive) Spannungen im Bereich von  $0\ldots 5\text{ V}$  abtasten. Mit einer geschickten Beschaltung des M1K-Eingangs mit einem Spannungsteiler ähnlich wie bei einem Tastkopf können jedoch auch größere und negative Spannungen gemessen werden. Hierzu wird ein sogenannter „Steckadapter“ verwendet. Details siehe Abschnitt 2.5.

#### 1.2 Arbiträrgenerator

Ein **Arbiträrgenerator ist ein Funktionsgenerator**, welcher beliebige Signalverläufe als Spannungen ausgeben kann. Der M1K leistet dies im „**SVMI“-Modus**. Darüber hinaus kann er im „**SIMV“-Modus** einen Signalverlauf zusätzlich als Stromverlauf ausgeben. In der Benutzeroberfläche `smuc` sind die möglichen Signalarten jedoch auf DC, Sinus-, Dreieck-, Sägezahn- und Rechteckfunktion beschränkt worden.

Die Signalverläufe erzeugt ein DA-Wandler mit 16 Bit Auflösung und maximal  $100\text{ kS/s}$  Abtastrate.

#### 1.3 Source Measure Unit

„**SMU**“ steht für **Source Measure Unit**: Der M1K arbeitet in dieser Funktion gleichzeitig als Arbiträrgenerator und als Oszilloskop. Hiermit kann z.B. die komplexe Impedanz eines Kondensators bestimmt werden, indem er mit einer Sinusspannung beaufschlagt wird und der dabei entstehende Stromverlauf durch ihn synchron gemessen wird. Der Namen der Benutzeroberfläche „**smuc**“ steht übrigens für **Source Measure Unit Control**.

Im „**SVMI“-Modus** wird sowohl der erzeugte Spannungsverlauf als auch der damit verbundene Stromverlauf abgetastet und im Oszilloskopbild dargestellt. „SVMI“ steht für „Source Voltage Measure Current“. Im „**SIMV“-Modus** wird entsprechend ein Stromverlauf erzeugt und der damit verbunde-

ne Spannungsabfall an der Last sowie der fließende Strom selbst abgetastet und im Oszilloskopbild dargestellt. „SIMV“ steht für „Source Current Measure Voltage“.

Angesteuert und ausgelesen wird der M1K mit C++ oder Python-Programmen. In den Praktika wird die Benutzeroberfläche `smuc` verwendet, welche aus dem M1K ein **virtuelles Instrument** macht. `smuc` ist in Python3 geschrieben und befindet sich als ausführbares Python-Skript auf den Labornrechnern des Praktikums.

Nähere Infos vom Hersteller Analog Devices zum M1K sind unter <https://wiki.analog.com/university/tools/m1k> zu finden. Analog Devices bietet die im Vergleich zu `smuc` weitaus umfangreichere Benutzeroberfläche `AliceDesktop` an.

Weitergehende Informationen zu `smuc` sowie Installationsdateien und -anweisungen (für Windows 10 und Ubuntu Linux 18.04/20.04) finden sich unter <https://github.com/StefanMack/M1K>.

## 2 Messen mit dem M1K

### 2.1 Starten von `smuc` unter Ubuntu (Laborrechner Sensorlabor):

Nach der Anmeldung unter dem Benutzernamen „bachelor“ mit `strg + alt + t` ein Terminalfenster öffnen. Darin mit `cd smuc` in das Verzeichnis mit den acht Pythonskripten von `smuc` navigieren. `smuc` entweder mit `./smuc.py` oder mit `python3 smuc.py` starten. Bei Start von `smuc` sollte das M1K mit dem PC via USB verbunden sein und die LED auf dessen Unterseite grün leuchten. Falls die Oberfläche nicht innerhalb weniger Sekunden erscheint, am PC die Taste `strg` drücken.

### 2.2 M1K an Versuchsaufbau anschließen und mit `smuc` bedienen

Wenn Sie den Mauszeiger über die entsprechenden Buttons, Eingabefelder usw. bewegen, dann werden dazu deren Funktion als Tooltips angezeigt. Der Vorteil eines virtuellen Instruments ist, dass es durch den Bediener nicht beschädigt werden kann – es sei denn die Software ist fehlerhaft.

Der M1K wird via USB mit dem PC verbunden und von dort aus auch mit Spannung versorgt. Beachten Sie dass daher der GND-Anschluss des M1K auf gleichem Potential wie z.B. der GND-Pin eines gleichzeitig am PC angeschlossenen Arduino ist.

Für die Arbeit im Praktikum sind nur die Buchsen gegenüber des USB-Anschlusses von Bedeutung: CH A bzw. CH B sind im „HI-Z-Modus“ die Eingänge des Oszilloskops. Im „SVMI“ und „SIMV“-Modus sind es die Ausgänge des Arbiträrgenerators bzw. des SMU.

Alle Signale werden in Bezug auf GND gemessen bzw. erzeugt. An den Ausgängen „2.5V“ und „5.0V“ liegt eine Gleichspannung von 2,5 bzw. 5,0 V an. Wird für den Arbiträrgenerator eine dieser Spannungen statt GND als Bezug verwendet, so können auch bipolare oder negative Signalverläufe erzeugt werden. In diesem Fall ist für die Last gewissermaßen 2,5 bzw. 5,0 V der neue „GND“. Werden gleichzeitig andere am PC oder selben Stromnetz angeschlossene Geräte verwendet, dann besteht hierbei jedoch die Gefahr eines Massekurzschlusses: Denn beispielsweise bei einem gleichzeitig angeschlossenen Arduino liegen dessen GND und der „2,5 V GND“ des M1K nun nicht mehr auf dem selben Potential!

Wie man den M1K eingangsseitig im „HI-Z-Modus“ so beschalten kann, dass er bipolare Spannungen >5 V messen kann ist in <https://wiki.analog.com/university/tools/m1k/analog-inputs> dargestellt (siehe hier Fig.4).

Hierbei wird dem M1K ein passives Widerstandsnetzwerk vorgeschaltet. Um einen linearen Frequenzverlauf dabei zu erreichen sind ähnlich wie bei einem Tastkopf noch eine abgleichbare Kapazität zur Kompensation der parasitären Kapazitäten (Kabel und Eingänge des M1K) nötig.

Durch die Auflösung des AD-Wandlers von 16 Bit kann der M1K theoretisch eine Spannung bzw. einen Strom auf  $1/2^{16}$  Full Scale Range (5 V bzw. 250 mV) genau messen. Dies entspricht einem LSB ( $\Delta S$ ) von 76  $\mu V$  bzw. 3,8  $\mu A$ . In der Realität wird dies natürlich nicht erreicht, da der AD-Wandler einen Offsetfehler, eine Steigungsfehler und auch einen Linearitätsfehler besitzt.

Der Offsetfehler und der Steigungsfehler (Gain) können durch eine Kalibrierung auf kleiner 0,1 mV bzw. 0,1 mA reduziert werden. Die ermittelten Kalibrierwerte für Offset und Gain werden dafür in die Eingabemaske in `smuc` rechts neben dem Oszilloskopbild eingegeben. Zum Kalibrieren des AD-

Wandlers wird die GND-Referenz am M1K sowie eine hochgenaue 5 V Referenzspannung verwendet.

### Tipp:

Darf der Restfehler nach der Kalibrierung noch ca. 0,1 % betragen so kann auch die vom Arbiträr-generator (DC, Max = 5.000 V) erzeugte Spannung als 5 V Referenz verwendet werden.

## 2.3 smuc bedienen

Nachfolgend wird exemplarisch beschrieben, wie für den Versuch „Abstandsmessende Sensoren“ des Praktikums Sensortechnik der Ultraschallsensor mit der Software `smuc` vermessen wird.

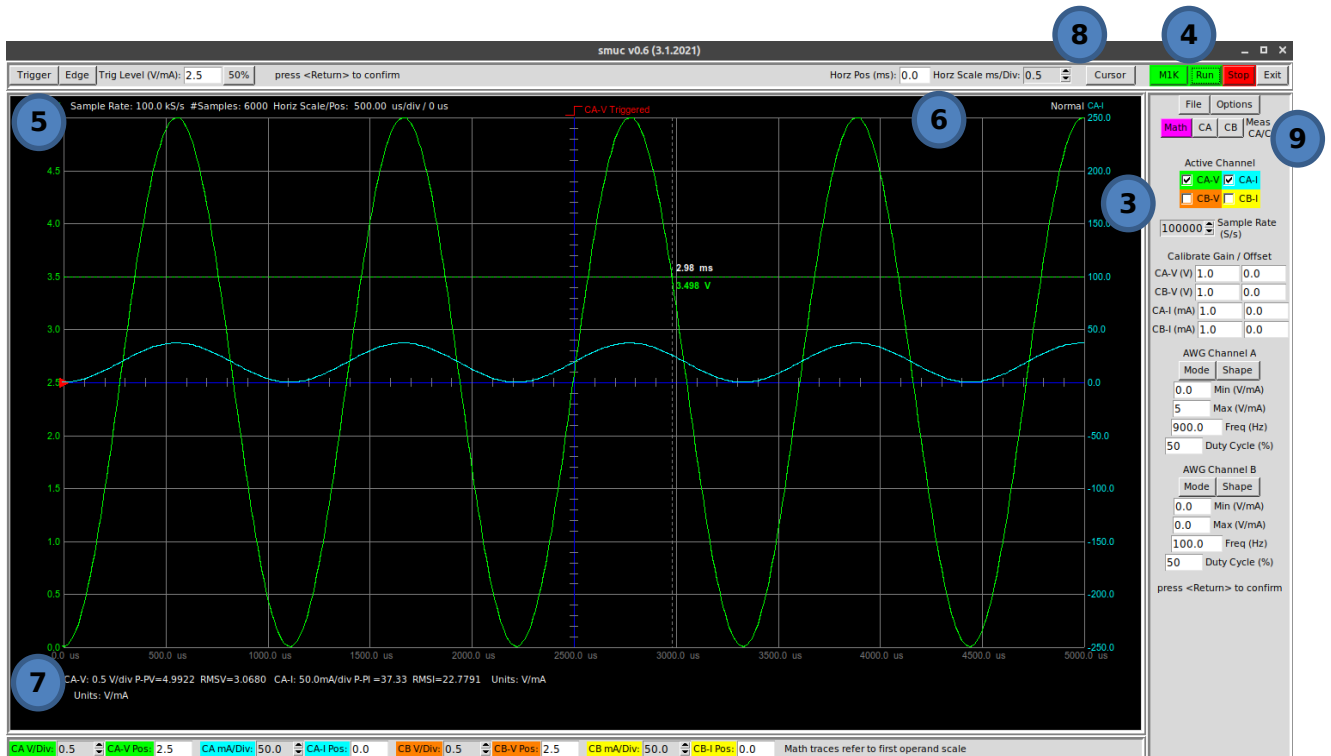


Abbildung 1: Screenplot `smuc`.

Die Nummern beziehen sich auf die Zahlen im Screenplot von `smuc` in Abb. 1.

1. `smuc` starten.
2. GND des Arduino mit GND des M1K verbinden. Das Kabel für das analoge Echosignal von der Bestückungsseite der Ultraschallsensor-Platine mit CH A verbinden. Mit einem Jumperkabel den Echo-Pin des Ultraschallsensors mit CH B des M1K verbinden.
3. Bei `smuc` unter „Active Channel“ CA-V und CA-B aktivieren.
4. Die kontinuierliche Abtastung über die grüne Taste „Run“ starten. Im Oszibild erscheinen nun in Grün das analoge Echosignal und in Orange das Pulsweitsignal (ungetriggert).
5. Unter „Trigger“ „CB-V“ auswählen und den „Trigger Level“ in mV passend wählen, damit ein Triggern des Pulsweitsignals stattfindet. Ist dies der Fall, so wird das über dem Oszibild mit „Triggered“ in roter Schrift angezeigt.
6. Mit „Horz Scal“ wird das Oszibild in x- bzw. Zeit-Richtung aufgeweitet, mit „Horz Pos“ in x- bzw. Zeit-Richtung verschoben. Die Eingabewerte hierbei sind Millisekunden.
7. In y-Richtung wird das Signal mit den farblich zugehörigen Eingabefeldern „V/Div“ aufgeweitet bzw. mit „Pos“ verschoben. Die Eingabewerte hierbei sind Volt, bei den beiden Stromkanälen entsprechend mA.
8. Über die Taste „Cursor“ wird für einen bestimmten Kanal der Cursor aktiviert. Mit einem Maus-Rechtsklick wird ein Cursorkreuz erzeugt, welches den Zeit- und Signalwert anzeigt. Wenn das Abtasten mit „Stop“ unterbrochen wurde, werden mit Maus-Linksklicks mehrere

kleine Cursorskreuze erzeugt und deren Position im Oszibild links oben angezeigt. Werden solche Cursorskreuze z.B. bei zwei aufeinander folgenden Maxima eines Sinussignals gesetzt, so wird dessen Frequenz berechnet.

9. Mit den Tasten „CA“ bzw. „CB“ werden Messfunktionen für die Kanäle A bzw. B ausgewählt. Die Messergebnisse werden unterhalb des Oszibilds angezeigt.

Soll der M1K als Funktionsgenerator (AWG) verwendet werden, so wird über die Taste „Mode“ statt „HI-Z“- der „SVMI“- oder „SIMV“-Modus aktiviert und über die Taste „Shape“ die Art des zu erzeugenden Signals (DC, Sinus, Rechteck,...) ausgewählt. Die Amplitude, Frequenz und das Tastverhältnis wird über die entsprechenden Eingabefelder eingegeben.

## 2.4 Bipolare Spannungen mit dem M1K erzeugen

Der M1K kann Spannungssignale nur unipolar im Bereich von 0...5 V bezogen auf GND erzeugen. „Unipolar“ bedeutet, es gibt GND („Ground“ oder „Masse“) als Bezugspotential, und die erzeugte Spannung ist dazu immer positiv – also auf höherem Potential.

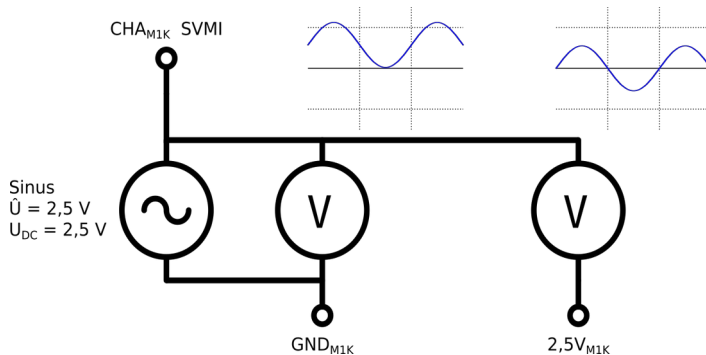


Abbildung 2: Erzeugen eines bipolaren Sinussignals mit 2,5 V Scheitelwert mit dem M1K.

Bench Top Funktionsgeneratoren arbeiten überwiegend bipolar: Hier gibt es auch das Bezugspotential GND, die Geräte können aber sowohl negative als auch positive Spannungen bezogen auf GND erzeugen.

In der M1K-Funktion als Arbiträrgenerator erzeugt ein unipolarer DA-Wandler die eingestellte Spannung im Bereich 0...+5 V.

Wird eine elektronische Schaltung mit dem M1K untersucht, dann muss GND jedoch nicht zwingend das Bezugspotential

sein.

Soll beispielsweise ein Kondensator mit einer (bipolaren) Wechselspannung untersucht werden, so ist dies mit folgendem Trick auch mit dem M1K machbar:

Der M1K besitzt einen Festspannungsausgang mit 2,5 V, der nun als Bezugspotential anstelle von GND verwendet wird.

**Wird im SVMI-Modus ein Sinus-Signal mit Min = 0 V und Max = 5 V erzeugt, so entsteht in Bezug auf die 2,5 V Festspannung ein reines (bipolares) Wechselsignal mit einem Scheitelwert  $\hat{U}$  von 2,5 V. Der ursprüngliche Gleichanteil  $U_{DC}$  verschwindet durch den Bezug auf 2,5 V.**

Der Wechsel von GND auf 2,5 V als Bezugspotential verschiebt quasi das erzeugte Sinussignal um 2,5 V Richtung negativer Spannung. Siehe Abb. 2.

Um mit dem M1K eine „echte“ auf GND bezogene bipolare Spannung zu erzeugen, wird jedoch eine aktive Elektronik (Operationsverstärkerschaltung) benötigt.

## 2.5 Bipolare Spannungen mit dem M1K messen

AD-Wandler messen normalerweise nur unipolare Spannungen. „Unipolar“ bedeutet, es gibt GND („Ground“ oder „Masse“) als Bezugspotential, und die Messspannung ist dazu immer positiv – also auf höherem Potential. Dies nennt man im Kontext von AD-Wandlern auch „single-ended“ im Gegensatz zu „differential“.

Bench Top Oszilloskope messen bipolar: Hier gibt es auch das Bezugspotential GND, die Geräte können aber sowohl negative als auch dazu positive Spannungen messen.

In seiner Funktion als Oszilloskop tastet das M1K das zu messende Signal direkt mit seinem unipolaren 16-Bit AD-Wandler ab. Es können daher nur positive Spannungen im Bereich 0...+5 V gemessen werden. Ströme werden hingegen bipolar im Bereich -250...+250 mV gemessen.

Um auch bipolare Spannungen zu messen, benötigt der M1K eingangsseitig eine passive Elektronik, die die Eingangsspannung ähnlich wie ein Oszilloskop-Tastkopf teilt (= reduziert). Damit auch negative Spannungen gemessen werden, hebt die Elektronik die geteilte Eingangsspannung zusätzlich um einen Offset an.

Dies wird in der in Abb. 3 dargestellten Schaltung erreicht, welche auf dem sogenannten „Steckadapter“ aufgebaut ist.

Das Ersatzschaltbild für den M1K-Eingang aus Sicht des Signals ist ein Lastwiderstand  $R_{M1K}$  (ca. 1 M $\Omega$ ) parallel mit einer Kapazität  $C_{M1K}$  (ca. 380 pF) gegen GND.

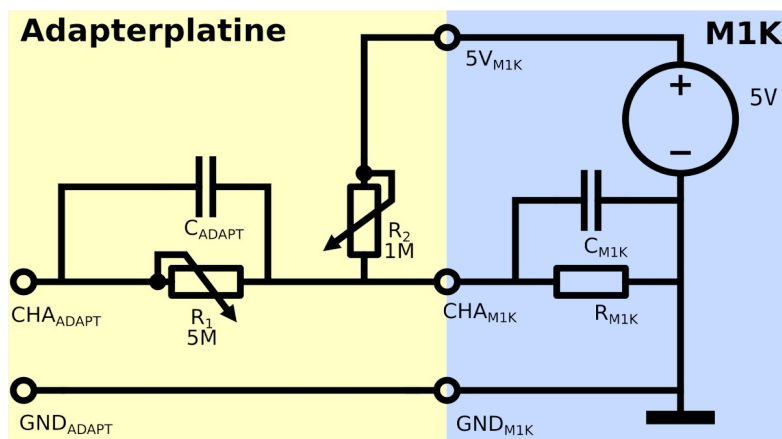


Abbildung 3: Steckadapter für den M1K um bipolare Spannungssignale zu messen. Der Abgleich der Potentiometer bestimmt das Teilungsverhältnis und den Offset.

Mit dem Steckadapter liegt das Eingangssignal  $CHA_{ADAPT}$  nicht mehr direkt am Eingang  $CHA_{M1K}$  des M1K also am Lastwiderstand  $R_{M1K}$  an, sondern läuft über den einstellbaren Vorwiderstand  $R_1$ . Weiter ist der Eingang  $CHA_{M1K}$  des M1K über den einstellbaren Widerstand  $R_2$  mit der 5 V Festspannung verbunden, was den gewünschten Offset verursacht.

$R_1$  und  $R_{M1K} \parallel R_2$  bilden einen Spannungsteiler, der das Eingangssignal teilt = reduziert.

Die Kapazität  $C_{ADAPT}$  wird wie bei einem Tastkopfabgleich so gewählt, dass das Teilungsverhältnis weitgehend frequenzunabhängig ist.  $C_{ADAPT}$  kompensiert sozusagen die Kapazität  $C_{M1K}$  des M1K.

Der Steckadapter wirkt sich nur auf CHA aus. Alle anderen Eingänge des M1K werden unverändert auf die entsprechenden Eingänge des Steckadapters durchgeschleift.

Der Steckadapter ist für zwei unterschiedliche Konfiguration vorgesehen, für die die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  jeweils anders abgeglichen werden müssen. Damit die Software `smuc` mit aufgestecktem Steckadapter die richtigen Werte anzeigt, müssen der Teilungsfaktor (Gain) sowie der Offset für CHA unter „Calibrate Gain / Offset“ eingestellt sein.

### 2.5.1 Abgleich Steckadapter für Offset 2,5 V und 4x Teilverhältnis (bipolare Eingangsspannungen mit Quellenwiderstand $\ll 1$ M $\Omega$ )

Diese Konfiguration wird verwendet, um niederohmige Signale an  $CHA_{ADAPT}$  im Bereich -10...+10 V messen zu können. Dies entspricht der DC-Kopplung bei einem Oszilloskop. „Niederohmig“ bedeutet hier, dass der Quellenwiderstand wesentlich kleiner als  $R_1$ ,  $R_2$  bzw.  $R_{M1K}$  ist.

Der Steckadapter reduziert erstens die an  $CHA_{ADAPT}$  anliegende Spannung um den Faktor 4 und hebt sie zweitens um 2,5 V an. Die folgende Tabelle zeigt hierfür einige Beispielspannungen.

Eingangsspannung an CHA <sub>ADAPT</sub>	Spannung an CHA <sub>M1K</sub> (vom M1K gemessen)
0 V (GND)	2,5 V
+ 10 V	5 V
+5 V	3,75 V
-10 V	0 V

Für das Teilverhältnis 4x und den Offset von 2,5 V muss  $R_1 = R_{M1K}$  sowie  $R_2 = 1/2 R_{M1K}$  eingestellt werden. Dies wird durch folgende Abgleichprozedur erreicht:

1. **Anschluss CHA<sub>ADAPT</sub> floatet (unbeschaltet):  $R_2$  so abgleichen, dass an CHA<sub>M1K</sub> 3,333 V (2/3 von 5 V) anliegen.**
2. **Anschließend CHA<sub>ADAPT</sub> mit GND verbinden und  $R_1$  so abgleichen, dass an CHA<sub>M1K</sub> 2,500 V (1/2 von 5 V) anliegen.**

Der Jumper für die Kapazität  $C_{ADAPT}$  wird in die Position „4x“ ( $C_{ADAPT} = \text{ca. } 140 \text{ pF}$ ) gesteckt.

Die Schaltung des so abgeglichenen Steckadapters ist in Abb. 4 dargestellt (Annahme  $R_{M1K} = 1 \text{ M}\Omega$ ).

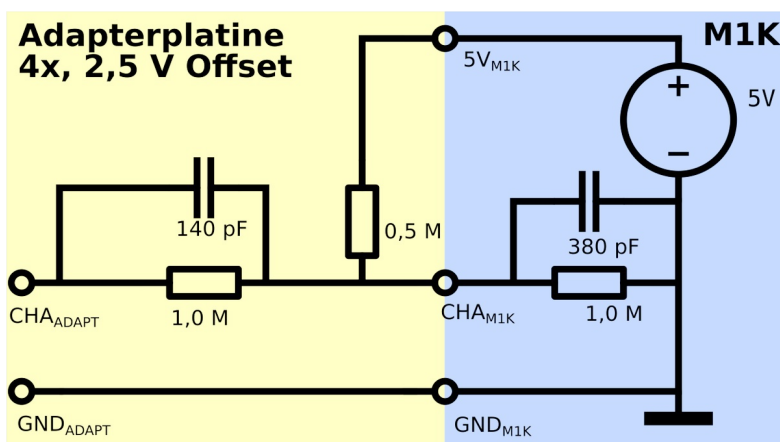


Abbildung 4: Steckadapter für ein 4x Teilverhältnis und 2,5 V Offset.  
Annahme  $R_{M1K} = 1 \text{ M}\Omega$ .

## 2.5.2 Abgleich Steckadapter für Offset 2,5 V und 10x Teilverhältnis (kapazitiv eingekoppelte bipolare Eingangsspannungen)

Diese Konfiguration wird verwendet, um die Eingangsimpedanz des M1K von 1 auf 5  $\text{M}\Omega$  zu erhöhen. Dadurch wird die Signalquelle weniger belastet, das Eingangssignal um den Faktor 10 reduziert.

Der Offset von 2,5 V bezieht sich auf ein kapazitives Einkoppeln des Signals an CHA<sub>ADAPT</sub>. Dies entspricht der AC-Kopplung bei einem Oszilloskop. Befindet sich zwischen der Signalquelle und CHA<sub>ADAPT</sub> keine Kapazität, so ändert sich der Offset auf 2,25 V, das Teilverhältnis bleibt bei 10x.

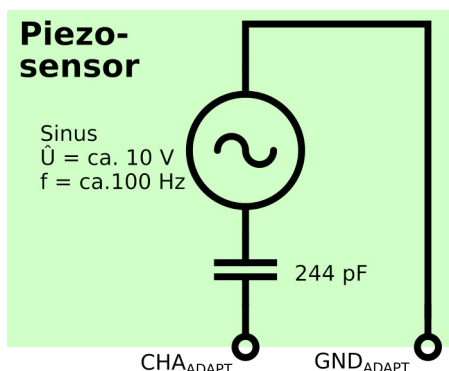


Abbildung 5: Elektrisches Ersatzschaltbild des Piezo-Vibrationssensors.

Diese Schaltung eignet sich beispielsweise um einen Piezovibrationssensor mit dem M1K zu messen: Das Ersatzschaltbild des Sensors ist eine Wechselspannungsquelle in Reihe mit einer Kapazität,  $C_{\text{Sens}}$  (ca. 240 pF) siehe Abb. 5. Die Kapazität bildet mit der Eingangsimpedanz des M1K einen Tiefpass. Ohne den Steckadapter liegt dessen Grenzfrequenz bei ca. 650 Hz. Der Steckadapter erhöht in diesem Fall die Eingangsimpedanz auf 5  $\text{M}\Omega$ , wodurch die Grenzfrequenz auf ca. 130 Hz sinkt.

Der Piezosensor erzeugt eine bipolare Wechselspannung mit einer Amplitude von ca. 10 V und Frequenz von ca. 100 Hz. Ohne Steckadapter würden die negativen Signalanteile nicht



gemessen. Mit der Steckadapter-Konfiguration aus Abschnitt 2.5.2 wäre sowohl die Teilung als auch die Eingangsimpedanz ( $1,333 \text{ M}\Omega$ ) zu klein: Der M1K wäre übersteuert und die Grenzfrequenz läge bei ca. 489 Hz, also zu hoch für die Piezofrequenz von ca. 100 Hz

Die hier beschriebene Steckadapter-Konfiguration reduziert erstens die an  $\text{CHA}_{\text{ADAPT}}$  anliegende Spannung um den Faktor 10 und hebt sie zweitens um 2,5 V an, falls das Eingangssignal wie bei dem Piezosensor kapazitiv eingekoppelt wird.

Die folgende Tabelle zeigt hierfür einige Beispielspannungen.

Scheitelwert Eingangsspannung an $\text{CHA}_{\text{ADAPT}}$	Scheitelwert Spannung an $\text{CHA}_{\text{M1K}}$ (vom M1K gemessen)
0 V (GND)	2,5 V
+ 10 V	3,5 V
+5 V	3,0 V
-20 V	0,5 V

Für das Teilverhältnis 10x und den Offset von 2,5 V muss  $R_2 = R_{\text{M1K}}$  sowie  $R_1 = 9/2 R_{\text{M1K}}$  eingestellt werden. Dies wird durch folgende Abgleichprozedur erreicht:

1. **Anschluss  $\text{CHA}_{\text{ADAPT}}$  floatet (unbeschaltet):  $R_2$  so abgleichen, dass an  $\text{CHA}_{\text{M1K}}$  2,500 V (1/2 von 5 V, 1:1 Spannungsteiler aus  $R_2$  und  $R_{\text{M1K}}$ ) anliegen.**
2. **Anschließend  $\text{CHA}_{\text{ADAPT}}$  mit GND verbinden und  $R_1$  so abgleichen, dass an  $\text{CHA}_{\text{M1K}}$  2,250 V ( $R_{\text{M1K}} \parallel R_1 / (R_1 + R_{\text{M1K}} \parallel R_1) = 9/20$  von 5 V) anliegen.**

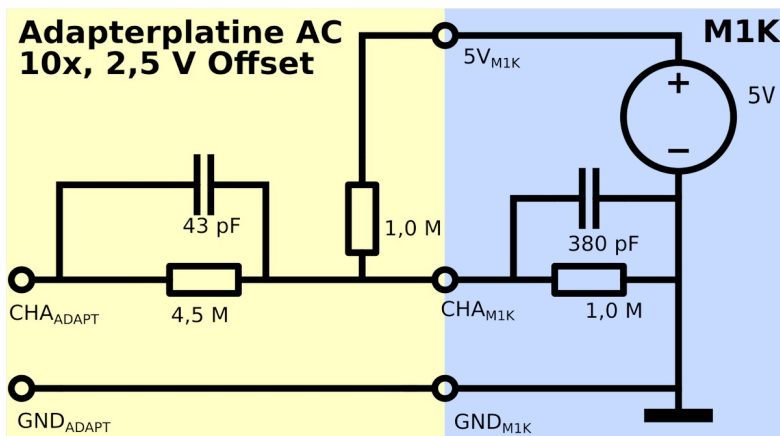


Abbildung 6: Steckadapter für ein 10x Teilverhältnis und 2,5 V Offset bei kapazitiver Einkopplung des Signals. Annahme  $R_{\text{M1K}} = 1 \text{ M}\Omega$ .

Der Jumper für die Kapazität  $C_{\text{ADAPT}}$  wird in die Position „10x“ ( $C_{\text{ADAPT}} = \text{ca. } 43 \text{ pF}$ ) gesteckt.

Die Schaltung des so abgeglichenen Steckadapters ist in Abb. 6 dargestellt (Annahme  $R_{\text{M1K}} = 1 \text{ M}\Omega$ ).