

**Versuch 2 :**  
**Sensoren und Brückenschaltungen**  
(Stand 11.2011)

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1. EINFÜHRUNG .....</b>	<b>2</b>
1.1 VERSUCHSINHALTE UND VERSUCHSAUSSTATTUNG .....	2
1.2 VERWENDETE GERÄTE UND SENSOREN .....	2
1.3 VORBEREITUNG, PROTOKOLLERSTELLUNG UND AUSARBEITUNG .....	2
<b>2. ARBEITSPUNKTE .....</b>	<b>3</b>
2.1 MESSOBJEKT FÜR TEMPERATURMESSUNG VORHEIZEN .....	3
2.2 INNENWIDERSTAND DES DMM 34410A BEI KLEINEN STROMMESSBEREICHEN .....	3
2.3 ÜBERTRAGUNGSKENNLINIE UND EMPFINDLICHKEIT EINER VIERTELBRÜCKE .....	5
2.4 TEMPERATURMESSUNG MIT DIGITALMULTIMETERN .....	8
2.5 DC-BRÜCKE MIT DEHNUNGSMESSSTREIFEN .....	10
2.5.1 <i>Empfindlichkeit einer DMS-Brücke</i> .....	10
2.5.2 <i>Temperaturabhängigkeit einer DMS-Brücke</i> .....	11
2.6 AC-BRÜCKE MIT DEHNUNGSMESSSTREIFEN .....	13

## 1. Einführung

### 1.1 Versuchsinhalte und Versuchsausstattung

- Präzisionsmessung mit Digitalmultimetern (DMM), Rückwirkungsfehler (Erzielbare Genauigkeit kennen lernen, wenn korrekt gemessen wird!)
- Temperaturmessung mit DMM's; 2-Leiter und 4-Leiter Anordnungen
- Gleichstrom- und Wechselstrombrücken im Ausschlagverfahren, Dehnungsmessstreifen, Störgrößen, Fehlerfortpflanzung

### 1.2 Verwendete Geräte und Sensoren

Folgende Geräte werden bei der Versuchsdurchführung verwendet:

- Arbeitsplatzrechner mit Intel i5 CPU (2,8 GHz) mit eingebauter PCIe-DAQ-Karte 6361E von National Instruments, auf dessen Ein-/Ausgänge über einen BNC-Connector-Bloch (BNC-2110) zugegriffen werden kann. [Weitere Infos zur DAQ-Karte](#) und zum [Connector-Block](#)
- Digitalmultimeter Agilent 34410A mit GPIB-, USB- und LAN-Schnittstelle (verwendet) [Weitere Infos zum 34410A](#)
- Handmultimeter/Leistungsmessgerät Metrahit Energy – [weitere Infos zum Metrahit](#)
- Funktionsgenerator Agilent 33521A mit USB- und LAN-Schnittstelle (verwendet) [Weitere Infos zum Funktionsgenerator](#)
- Programmierbares DC-Netzgerät Agilent E3648A mit zwei Ausgängen als Spannungs- oder Stromquelle [Weitere Infos zum Netzgerät](#)

### 1.3 Vorbereitung, Protokollerstellung und Ausarbeitung

*Vorbereitung:*

Die Vorbereitungsaufgaben sind bei den einzelnen Arbeitspunkten der Anleitung zu entnehmen und in die Anleitung zu integrieren.

*Protokoll:*

Als EDV-Protokoll ist diese Anleitung mit Ihren integrierten Vorbereitungen an den vorgesehenen Stellen zu ergänzen, indem vorgegebene Tabellen auszufüllen sind und diverse Screen Shots sowie Kommentare zu integrieren sind. Hierfür steht Open Office zur Verfügung. Alle Messergebnisse, insbesondere die der Digitalmultimeter, müssen mit möglichst vielen (allen stabilen) Stellen ins Protokoll übernommen werden!

**Wichtig:** Wenn Sie zu Hause mit Word arbeiten, speichern Sie das File am Ende des Praktikums im Word-Format ab!

*Ausarbeitung:*

Die Ausarbeitung besteht zum Einen aus der Überarbeitung des Protokollfiles und zum Anderen aus der Bearbeitung der explizit gestellten Ausarbeitungs-Aufgaben. Die Ausarbeitung ist ebenfalls in das gemeinsame File zu integrieren, welches dem Betreuer als CD, Email oder Ausdruck zu übermitteln ist. In jedem Fall ist das Deckblatt, welches über [Moodle Download](#) zu beziehen ist, vollständig ausgefüllt am Anfang einzubinden.

## 2. Arbeitspunkte

### 2.1 Messobjekt für Temperaturmessung vorheizen

Stellen Sie an einem Kanal des Netzgeräts eine Spannung von 10 V ein und legen diese an den Heizwiderstand von 33 Ω, der auf einem Aluminium-U-Profil aufgeschraubt ist. Dieser soll das Profil mindestens 15 Min lang auf eine Messtemperatur aufheizen. Der vorhandene **PT 100** Temperatursensor (4 Bananenbuchsen für 2- und 4-Leiter-Anschluss) darf noch **nicht mit aufgeheizt** werden!

### 2.2 Innenwiderstand des DMM 34410A bei kleinen Strommessbereichen

Der Innenwiderstand des 34410A bei Gleichstrommessung wird vom Hersteller nicht exakt angegeben, da der Wert des Shunt-Widerstandes durch Kontakt- und Leitungswiderstände verfälscht wird. Es wird lediglich der maximal mögliche Spannungsabfall bei Vollausschlag (Burden Voltage) als Obergrenze angegeben. Auszug aus dem Datenblatt für 34410A:

**Accuracy Specifications ± (% of reading + % of range)<sup>1</sup>**

Function	Range <sup>3</sup>	Frequency, Test Current or Burden Voltage	24 Hour <sup>2</sup> Tcal ±1°C	90 Day Tcal ±5°C	1 Year Tcal ±5°C	Temperature Coefficient/°C 0°C to (Tcal -5°C) (Tcal +5°C) to 55°C
DC Voltage	100.0000 mV		0.0030 + 0.0030	0.0040 + 0.0035	0.0050 + 0.0035	0.0005 + 0.0005
	1.000000 V		0.0020 + 0.0006	0.0030 + 0.0007	0.0035 + 0.0007	0.0005 + 0.0001
	10.00000 V		0.0015 + 0.0004	0.0020 + 0.0005	0.0030 + 0.0005	0.0005 + 0.0001
	100.0000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0040 + 0.0006	0.0005 + 0.0001
	1000.000 V <sup>4</sup>		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0040 + 0.0006	0.0005 + 0.0001
DC Current	100.0000 µA	< 0.03 V	0.010 + 0.020	0.040 + 0.025	0.050 + 0.025	0.0020 + 0.0030
	1.000000 mA	< 0.3 V	0.007 + 0.006	0.030 + 0.006	0.050 + 0.006	0.0020 + 0.0005
	10.00000 mA	< 0.03 V	0.007 + 0.020	0.030 + 0.020	0.050 + 0.020	0.0020 + 0.0020
	100.0000 mA	< 0.3 V	0.010 + 0.004	0.030 + 0.005	0.050 + 0.005	0.0020 + 0.0005
	1.000000 A	< 0.8 V	0.050 + 0.006	0.080 + 0.010	0.100 + 0.010	0.0050 + 0.0010
	3.000000 A	< 2.0 V	0.100 + 0.020	0.120 + 0.020	0.150 + 0.020	0.0050 + 0.0020

#### DC Current

##### Current Shunt:

200 Ω for 100 µA, 1 mA  
 2 Ω for 10 mA, 100 mA  
 0.1 Ω for 1 A, 3 A



Für Fehlerfortpflanzung verwenden!

Aufgabe dieses Unterpunktes ist es, den Innenwiderstand  $R_A$  des DMM bei Gleichstrommessung sowie den tatsächlichen Spannungsabfall bei Vollausschlag ( $U_{A,max} = \text{Burden Voltage}$ ) in den später relevanten Messbereichen  $I_{max} = 100 \mu\text{A}, 1 \text{ mA}, 10 \text{ mA}$  und  $100 \text{ mA}$  zu messen.

#### Durchführung:

1. Zunächst ist der Strom des verwendeten Kanals des Netzgerätes auf 100 mA zu begrenzen: Ausgang wählen und kurzschließen → mit Voltage/Current Taste Strom auswählen und auf 100 mA einstellen. Die gewünschte Stelle wird mit den Tasten < und > ausgewählt.
2. Dekadenwiderstand auf 5 kΩ einstellen und Strom durch die Dekade mit dem 34410A messen. Stellen Sie zunächst eine Spannung von ca. 2 V am Netzgerät ein.
3. Am 34410A den Messbereich manuell einstellen und mit dem Widerstand den Strom auf den Wert des jeweiligen Messbereichs annähern. (weiterhin 2V am Netzgerät)
4. NPLC (Number of Power Line Cycles) am 34410A auf 10 einstellen (höhere Genauigkeit):
5. Messen Sie den Spannungsabfall am Strommessgerät mit dem Metrahit Energy Handmultimeter (günstigsten Messbereich wählen) und protokollieren für alle Messbereiche die Messwerte von angezeigtem Strom ( $I_{max}$ ) und Spannungsabfall am Strommesser ( $U_{A,max}$ ) und berechnen die Werte der Innenwiderstände  $R_A$  der Messbereiche. Vergleichen Sie die  $R_A$ -Werte mit den Shunt-Werten

Tabelle 1

Messbereich	100 $\mu$ A	1 mA	10 mA	100 mA
I <sub>max</sub>	100,01 $\mu$ A	1,000 mA	9,993 mA	99,90 mA
U <sub>A,max</sub>	19,852 mV	198,1 mV	23,91 mV	238,49 mV
Auswerten: R <sub>A</sub>	198,5 $\Omega$	197,96 $\Omega$	2,393 $\Omega$	2,387 $\Omega$
Shunt-Wert	200 $\Omega$	200 $\Omega$	2 $\Omega$	2 $\Omega$
Toleranz von R <sub>A</sub>	0,1706 %	0,152 %	-	-

Ist die Angabe für die „Burden Voltage“ des 34410A erfüllt und warum weicht der Messwert von R<sub>A</sub> vom Shunt-Wert ab? (Antwort gleich eintragen!)

Die Angabe für die Burden Voltage ist erfüllt, da das gemessene U<sub>A,max</sub> kleiner ist. Der Messwert von R<sub>A</sub> weicht vom Shunt-Wert ab, weil durch die Spannungsmessung am Ampere-meter der Shunt-Wert leicht durch den hochohmigen Innenwiderstand vom Spannungsmessgerät verfälscht wird.

**Auswertung:**

Berechnen Sie die Toleranz  $\delta_{gRa}$  von R<sub>A</sub> für die Messbereiche 100  $\mu$ A und 1 mA (Methode egal) und tragen Sie die Ergebnisse in die oben stehende Tabelle ein.

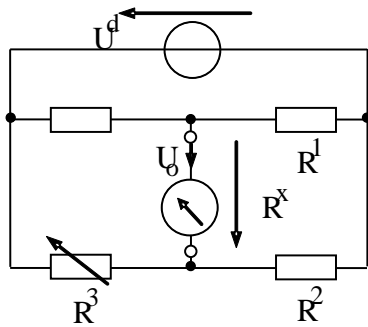
Auszug aus Metrahit Energy:

Mess-funktion	Messbereich	Auflösung bei Messbereichsendwert		Eingangsimpedanz		Eigenunsicherheit bei Referenzbedingungen für High Resol 59999 Digit			Überlastbarkeit <sup>2)</sup>	
		60 000	6 000	...	~ / $\infty$	$\pm(\dots \% \text{ v. MW} + \dots \text{ D})$	$\pm(\dots \% \text{ v. MW} + \dots \text{ D})$	$\pm(\dots \% \text{ v. MW} + \dots \text{ D})$	Wert	Zeit
V	60 mV	1 $\mu$ V				0,02 + 15 mit ZERO	—	—	600 V DC AC eff Sinus	max. 10 s  dauernd
	600 mV	10 $\mu$ V		$\geq 17 \text{ M}\Omega$	$\geq 9 \text{ M}\Omega // < 50 \text{ pF}$	0,02 + 15 mit ZERO	0,2 + 30	1 + 30		
	6 V	100 $\mu$ V		$\geq 17 \text{ M}\Omega$	$\geq 9 \text{ M}\Omega // < 50 \text{ pF}$	0,02 + 15	0,2 + 30	1 + 30		
	60 V	1 mV		$\geq 17 \text{ M}\Omega$	$\geq 9 \text{ M}\Omega // < 50 \text{ pF}$	0,02 + 15	0,2 + 30	1 + 30		
	600 V	10 mV		$\geq 17 \text{ M}\Omega$	$\geq 9 \text{ M}\Omega // < 50 \text{ pF}$	0,02 + 15	0,2 + 30	1 + 30		

Berechnung von  $\delta_{gRa}$ :

Toleranz von R<sub>A</sub>:  $\delta_{gRa} = \delta_{gUa} + \delta_{gIe}$

### 2.3 Übertragungskennlinie und Empfindlichkeit einer Viertelbrücke



$$\begin{aligned}
 U_0 &= 5 \text{ V} \\
 R_1 &= 350 \ \Omega \\
 R_2 &= 350 \ \Omega \\
 R_3 &= 350 \ \Omega
 \end{aligned}$$

Bild 1

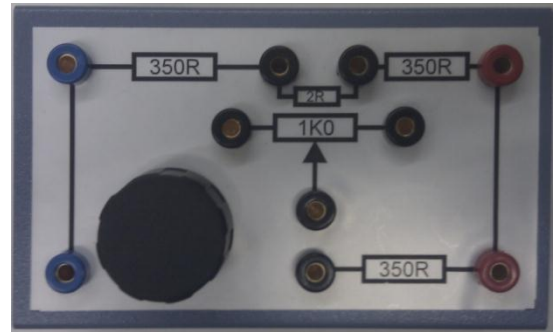
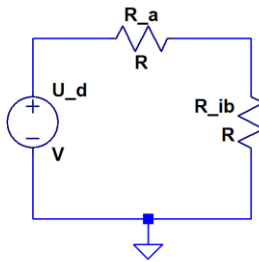


Bild 2

Eine Viertelbrücke mit einem Sensor  $R_X$  (Dekandenwiderstand) wird mit Hilfe des „Brückenrohlings“ (Bild 2) aufgebaut, wobei der  $2 \ \Omega$  Widerstand ( $2R$ ) überbrückt wird. Mit dem Drehknopf kann die Schleiferposition des  $1 \text{ k}\Omega$  Potentiometers ( $1K0$ ) eingestellt werden, was aber erst später bei der DMS-Brücke zum Abgleich verwendet wird.

#### Vorbereitungsaufgaben:

Skizzieren Sie ein Ersatzschaltbild (ESB) mit Spannungsquelle bezüglich der Klemmen a, b und berechne Sie aus den Widerstandswerten, in welchem Bereich der Innenwiderstand  $R_{ib}$  des ESB variiert, wenn sich  $R_X$  von  $0$  bis  $1 \text{ k}\Omega$  verändert.



$$R_a = \frac{R_1}{2} + \frac{R_3 \cdot R_x}{R_3 + R_x} \quad R_{ib} = \frac{U_d}{I_d} - R_a$$

$$175 \ \Omega < R_b < 434 \ \Omega$$

Begründen Sie, warum der Wert von  $U_d$  als Leerlaufspannung angenommen werden darf und stellen Sie unter dieser Voraussetzung eine Formel auf, mit der sich der Innenwiderstand  $R_{ib}$  aus den Messwerten  $U_d$ ,  $I_d$ , und Innenwiderstand  $R_A$  des Strommessers allgemein berechnen lässt.

Originalschaltung und Ersatzschaltung verhalten sich vollkommen gleich.

$$U_d = (R_a + R_{ib}) \cdot I_d$$

Berechnen Sie die Brückenempfindlichkeit  $dU_d/dR_X$  allgemein als Funktion von  $R_X$ ,  $R_3$  und  $U_0$  und geben Sie die Zahlenwerte für  $1 \ \Omega$ ,  $351 \ \Omega$ ,  $701 \ \Omega$  und  $1001 \ \Omega$  an. Tragen Sie die Zahlenwerte in die [Tabelle 4](#) in die entsprechende Zeile ein.

Hinweis: Es wurden keine runden  $R_X$ -Werte gewählt, da die Widerstandsänderung der Dekade beim Umschalten von  $0 \ \Omega$  auf  $1 \ \Omega$  ungenauer als bei anderen Stufen ist (Kontaktwiderstände)

$$\frac{dU_d}{dR_x} = \frac{-U_0 R - 3}{R_x^2 + 2R_x R_3 + R_3^2}$$

### Versuchsdurchführung Rückwirkungsfehler:

Bauen Sie zunächst die Schaltung entsprechend [Bild 1](#) auf und ermitteln Sie den Rückwirkungsfehler, indem Sie einen Wert von  $R_X$  so einstellen, dass im 10 mA Messbereich etwa der Strom +1 mA fließt. Schalten Sie nun den Messbereich auf 1 mA um und vergleichen Sie die beiden Werte!

$$R_X = 269,24 \Omega$$

Kommentar:

$$\text{Messbereich 10 mA: } I_d = 1,000 \mu\text{A}$$

$$\text{Messbereich 1 mA: } I_d = 0,62659 \mu\text{A}$$

### Versuchsdurchführung Brückenkennlinie:

Verändern Sie den Widerstand  $R_X$  entsprechend der nachfolgenden Tabelle und messen jeweils mit dem DMM 34410A die Brückenspannung  $U_d$  und den Brückenstrom  $I_d$ . Achten Sie darauf, dass stets der günstigste Messbereich eingestellt ist und protokollieren Sie den Strommessbereich  $I_{\max}$ , um den Rückwirkungsfehler bei der Strommessung korrigieren zu können.

Tabelle 2

$R_X/\Omega$	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$U_d/\text{V}$	2,493	1,3835	0,6793	0,1907	-0,1665	-0,4401	-0,656	-0,831	-1,097	-1,097	-1,200
$I_d/\text{mA}$	14,052	5,412	2,230	0,3565	-0,2973	-0,7600	-1,104	-2,024	-2,319	-2,557	-2,752
$I_{\max}/\text{mA}$	100	10	10	1	1	1	1	10	10	10	10

### Auswertung Brückenkennlinie:

Berechnen Sie den Innenwiderstand  $R_{ib}$  des ESB der Brücke entsprechend Vorbereitung aus  $U_d$ ,  $I_d$  und  $R_A$ . Verwenden Sie die Werte von  $R_A$  aus [Tabelle 1](#). Ermitteln Sie weiterhin den Kurzschlussstrom  $I_K$ , der bei rückwirkungsfreier Strommessung gemessen würde.

Tabelle 3

$R_X/\Omega$	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$R_A/\Omega$	2,387	2,393	2,393	197,96	197,96	197,96	197,96	2,393	2,393	2,393	2,393
$R_{ib}/\Omega$	175,03	252,82	302,26	336,96	362,08	381,12	396,26	408,18	418,3	427,8	434,29
$I_K/\text{mA}$	14,24	5,47	2,25	0,57	-0,459	-1,15	-1,66	-2,04	-2,33	-2,56	-2,77
$R_{ib}$ ber.	175,00	252,77	302,27	336,54	361,66	380,88	396,05	408,33	418,48	427,00	434,26

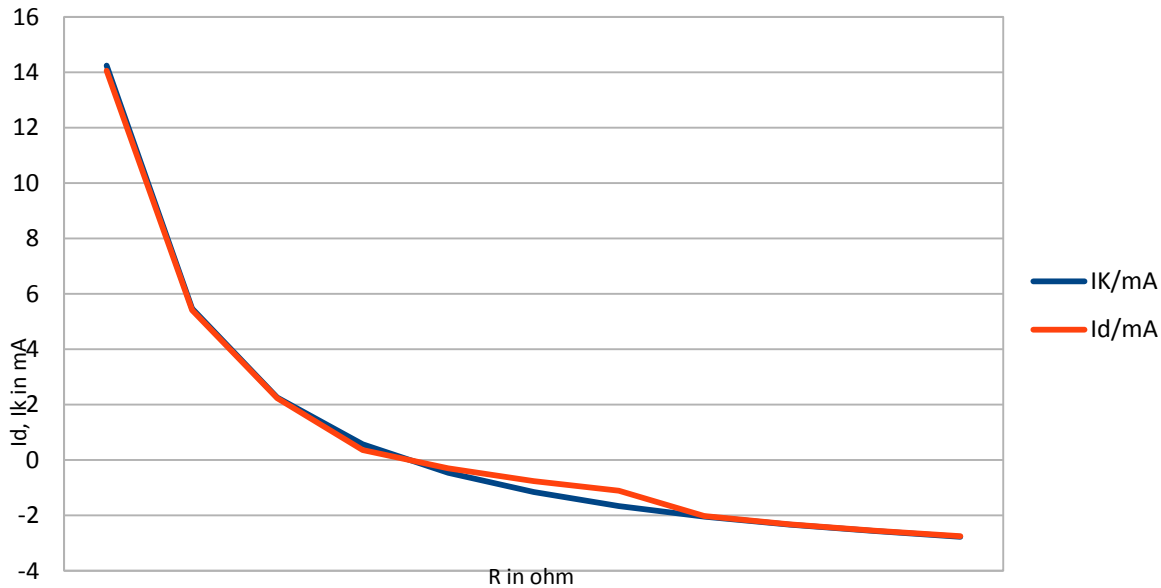
Vergleichen Sie die theoretisch aus den Widerständen  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  und  $R_X$  berechneten Wert von  $R_{ib}$  mit den gemessenen Werten für mindestens 4 Werte von  $R_X$  und bewerten Sie die Übereinstimmung.

Wie in der obigen Tabelle ersichtlich, stimmen die aus den Messwerten berechneten und die direkt berechneten Werte für  $R_{ib}$  über ein.

Skizzieren Sie den gemessenen Strom  $I_d$  und den Kurzschlussstrom  $I_K$  maßstäblich als Funktion von  $R_X$  und erklären Sie, warum der Verlauf von  $I_d$  nicht so „glatt“ ist, wie der von  $I_K$ .

Der Verlauf von  $I_d$  ist nicht so glatt, wie der von  $I_K$ , weil im Messbereich der mittleren Widerständen (300 – 600  $\Omega$ ) ist der zusätzliche Innenwiderstand des Messgerätes groß.

## Brückenkennlinien



### Versuchsdurchführung Empfindlichkeit:

Messen Sie die Brückenspannung  $U_d$  entsprechend nachfolgender Tabelle und ermitteln hieraus die Empfindlichkeit  $k_b$  für die Werte von  $R_X$  bei denen Sie die Empfindlichkeit theoretisch berechnet haben. Nähern Sie dabei den Differentialquotienten  $dU_d/dR_X$  durch den entsprechenden Differenzenquotienten an.

Hinweis: Es wurden keine runden Widerstandswerte verwendet, da der tatsächliche Widerstandssprung der Dekade beim Umschalten von  $0 \Omega$  auf  $1 \Omega$  wegen der Kontaktwiderstände ungenauer ist als bei anderen Werten.

Tabelle 4

$R_X/\Omega$	1	2	351	352	701	702	1001	1002
$U_d/V$	2,4799	2,4657	-3,905m	-7,401m	-0,8326	-0,8342	-1,2019	-1,2029
$k_b/(mV/\Omega)$ aus Messung	-14,2		-3,556		-1,6		-1	
$k_b/(mV/\Omega)$ aus Vorbereitung	-14,2		-3,56		-1,58		-0,96	

### Auswertung Empfindlichkeit:

Berechnen Sie die relative Abweichung der beiden Empfindlichkeiten  $\delta_{kb} = \frac{\delta_{kb,mess} - \delta_{kb,vorb}}{\delta_{kb,vorb}}$  und begründen Sie, warum die Abweichung i.d.R. in der Nähe des Abgleichs am geringsten ist.

$R_X/\Omega$	1	351	701	1001
$\delta_{kb}$	0 %	-0,112 %	1,2658 %	4,1667 %

Der Fehler der Empfindlichkeit ist ein nichtlinearer. Da allerdings im kleinen Bereich um den Nullpunkt, dieser ein annähernd linearer, deswegen ist dieser hier klein.

## 2.4 Temperaturmessung mit Digitalmultimetern

### Vorbereitung:

Berechne Sie den Temperaturfehler in °C, den man macht, wenn man mit einem PT 100 Temperatursensor bei 2-Leiter-Anschluss die Übergangs- und Leitungswiderstände von insgesamt 50 mΩ fälschlich mit misst. ( $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) Nehmen Sie lineare Temperaturabhängigkeit an.

Wenn Sie eine Aufheizkurve von Raumtemperatur auf ca. 50 °C aufzeichnen, ist dann unbedingt auf 4-Leiter Anschluss des Sensors zu bestehen?

$$R_i = 50\text{m}\Omega$$

$$R_{\text{Fehler}} = 100\Omega + 0,385 \cdot \Delta\theta + 50\text{m}\Omega$$

Pro Grad Celsius nimmt der Widerstand um 3,85 Ohm zu.

$$50\text{m}\Omega \Leftrightarrow 129,87 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Nein, ein 4-Leiter-Anschluss ist nicht notwendig, weil bder Widerstand  $R_x(T=50^\circ\text{C})=119\Omega$  groß ist. Der verfälschende Widerstand von 50 mΩ ist vernachlässigbar klein.

Die Einstellzeit auf 50 % des Endwerts der Temperaturmessenrichtung betrage  $t_{0,5} = 6 \text{ s}$ . Berechnen Sie die Zeit  $t_{0,99}$  für 99 %.

$$U = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \Leftrightarrow t_{gg} = 39,8635\text{s}$$

### Versuchsdurchführung:

Schließen Sie den PT 100 in 4-Leiter Technik an und Messen zunächst den Widerstand (nicht Temperatur) bei Wahl von „Ω 2W“ (2-Leiter) und „Ω 4W“ (4-Leiter) am 34410A. (NPLC = 10 wählen) Ergebnisse:

„Ω 2W“: 109,6 Ω

„Ω 4W“: 109,42 Ω

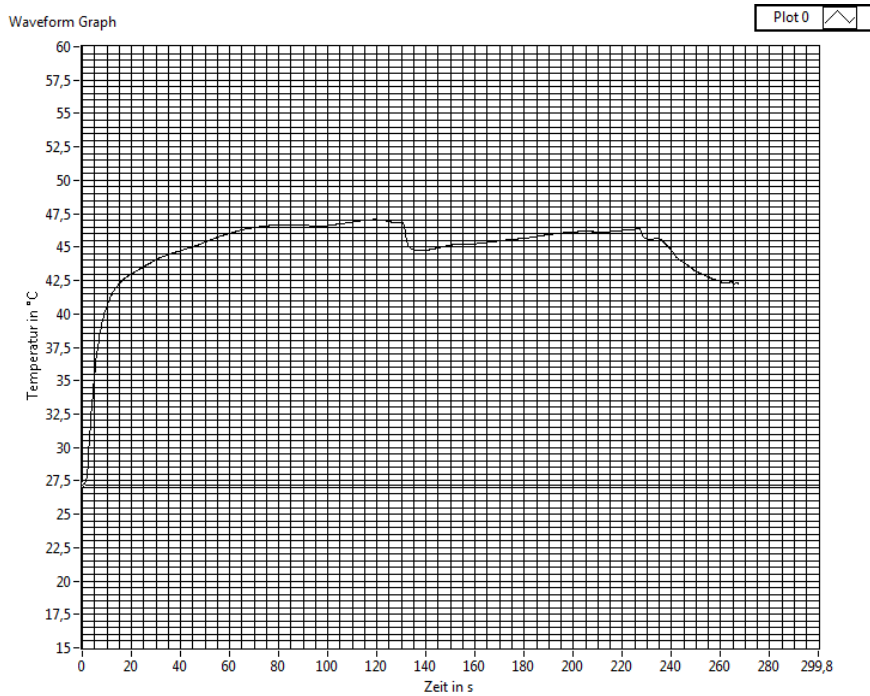
Wid.Fehler bei „Ω 2W“: 180 mΩ

Laden Sie das VI „Temp\_Aufz\_V2.vi und wählen den richtigen VISA resource name aus (über IP-Adresse identifizierbar) und stellen Sie die Anzahl der Messpunkte (Sample Count) mit einem sinnvollen Zeitabstand (Sample Time in s) so ein, dass sich eine Gesamtmesszeit von 5 Minuten ergibt. Starten Sie das VI und klemmen sofort danach den PT 100 unter die Klammer auf dem vorgeheizten Al-Körper so, dass er guten Wärmekontakt hat (Beschriftung nach oben). Erzeugen Sie nach ca. 150 s einen Luftstrom beim Sensor und beobachten Sie den Einfluss auf die Messkurve. Übernehmen Sie die Kurve nachfolgend ins Protokoll.

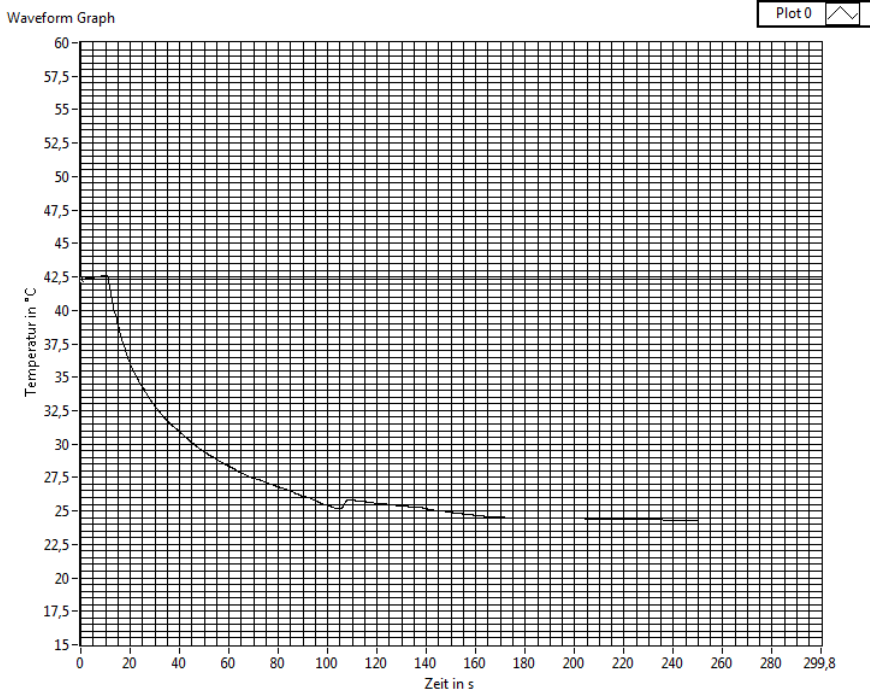
Hinweis: Wegen der nicht konstanten Luftbewegung und da der Sensor den Al-Körper auch lokal abkühlt, ergibt sich keine saubere e-Funktion.

Ziehen Sie nun den aufgeheizten Sensor aus der Klammer raus und starten Sie nochmals die 5 Minuten-Messung (Abkühlkurve) Vermeiden Sie zusätzliche Luftströmungen am Sensor. Übernehmen Sie die Abkühlkurve ins Protokoll.





Anstiegskurve



Abkühlkurve

**Auswertung:**

Ermitteln Sie nachvollziehbar die Zeitkonstante für den Aufheizvorgang  $\tau_{\text{heiz}}$  und den Abkühlvorgang  $\tau_{\text{kühl}}$ .

$$\tau_{\text{heiz}} = 10\text{s}, \quad \tau_{\text{kühl}} = 40\text{s}$$

Warum stimmt Ihrer Meinung nach die Abkühlkurve besser mit einer e-Funktion überein als die Aufheizkurve?

Wegen der nicht konstanten Luftbewegung (Turbolente Strömungen, nur durch sehr sehr komplizierte Integrale numerisch und so lösbar :) und durch Wärmeabfuhr durch die Kupfermesskabel, gibt sich keine saubere Messkurve.

## 2.5 DC-Brücke mit Dehnungsmessstreifen

### 2.5.1 Empfindlichkeit einer DMS-Brücke

**Wichtiger Hinweis:** Da der Eisenstab auf Grund seiner mechanischen Eigenschaften eine Hysteresis hat, darf er nur nach unten verbogen werden, z.B. durch Gewichte. Ein nach oben biegen verfälscht den Nullpunktgleich!

Hängen Sie die Gewichtshalterung auf und drücken Sie den Eisenstab mit der Hand leicht nach unten und lassen ihn wieder los. Messen Sie dann den Widerstand des Zug-DMS mit dem 34410A Multimeter ( $\Omega$  2W mit NPLC = 10). Belasten Sie dann die Gewichtshalterung mit 1 kg und messen den veränderten Widerstand. Ermitteln Sie die Widerstandsänderung  $\Delta R$ .

ohne Gewicht: 250,42  $\Omega$

mit 1kg Gewicht: 250,58  $\Omega$        $\Delta R = 160 \text{ m}\Omega$

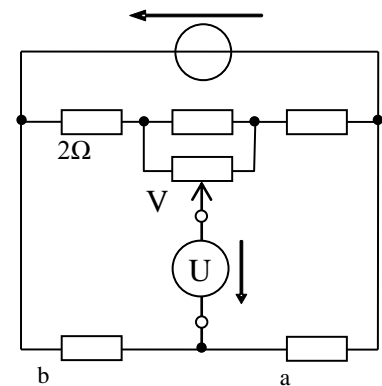
Ermitteln Sie ab etwa welcher Gewichtsaufgabe sich die Widerstandsanzeige bei der letzten Stelle sich um 1 Digit ändert.

Erforderliche Gewichtänderung  $\Delta m$  etwa: 50 g

Bauen Sie die Schaltung entsprechend nebenstehender Skizze auf und gleichen Sie die Brücke mit aufgehänger Gewichthalterung aber ohne Gewichte ab. (PLC = 10 einstellen) Verwenden Sie für die Versorgungsspannung den auf 100 mA begrenzten Kanal. Notieren Sie  $U_d$  im Abgleich, falls dieser sich nicht genau auf Null abgleichen lässt. Legen Sie 1 kg in die Gewichtshalterung und messen nun die Spannung.

$U_d$  im Abgleich: 0 V

$U_d$  mit 1 kg: -0,571 mV



Diese Spannungsänderung kann mittels der Empfindlichkeit  $k_b$  in eine Widerstandsänderung umgerechnet werden, was eine Methode mit höherer Auflösung als die direkte Messung darstellt.

Da diese Schaltung nicht identisch mit der von Bild 1 ist, darf die Empfindlichkeit  $k_b$  nicht von [Kap. 2.3](#) übernommen werden (Werte sind nur ähnlich) Um  $k_b$  messtechnisch zu ermitteln muss der Widerstand des DMS definiert verändert werden. Günstig ist es, ihn durch Parallelschalten eines hochohmigen Parallelwiderstandes  $R_p$  zu erniedrigen.

Berechnen Sie den Widerstand, der zum DMS parallel geschaltet werden muss, damit sich der Gesamtwiderstand um 1  $\Omega$  erniedrigt, also  $\Delta R = -1 \Omega$  gilt  $R_p = 122,443 \text{ k}\Omega$

Schalten Sie nun  $R_p$  parallel zum DMS (Brücke abgeglichen mit aufgehänger Gewichthalterung) und messen Die Spannungsänderung.

$U_d$  ohne  $R_p$ : 0,0 mV

$U_d$  mit  $R_p$ : 4,285 mV

$\Delta u_d$ : 4,285 mV

Empfindlichkeit  $k_b = 4,285 \text{ mV}/\Omega$

Berechnen Sie nun die Widerstandsänderung  $\Delta R$  des DMS bei Belastung mit 1kg aus dieser Empfindlichkeit  $k_b$  und der entsprechenden vorher gemessenen Spannungsänderung. Legen Sie 1g Gewicht die Halterung und schätzen ab, um wie viele Digits sich die letzte Stelle ändert.

## 2.5.2 Temperaturabhängigkeit einer DMS-Brücke

Mit dem Metrahit Handmultimeter kann mittels eines auf dem Biegestab angebrachten PT100-Schichtwiderstands die Temperatur des Biegestabes gemessen werden. (grüne Buchsen „Temp. Sens.“ Der Stab kann mittels einer Wirbelstromheizung (gelbe Spule) aufgeheizt werden.

**Vorsicht!** An die Spule der Wirbelstromheizung können mit dem Regeltrafo bis zu 230V Netzspannung angelegt werden – Steckkontakte nicht öffnen / berühren! Die Spule darf auch nicht ohne den Biegestab als Kernmaterial eingeschaltet werden, da der Strom wegen der dann niedrigeren Induktivität zu groß werden kann.

### Viertelbrücke

Gleichen Sie die Brücke mit einem DMS (Zug-DMS) bei Raumtemperatur ohne Gewicht ab und protokollieren Sie die Spannung  $U_d$  ohne und mit 1kg Gewicht sowie die zugehörige Anfangstemperatur am Biegestab. Entfernen Sie das Gewicht und heizen Sie dann den Biegestab auf etwas mehr als 40 °C auf und lassen ihn dann abkühlen. Bei der Temperatur von 40 °C lesen Sie dann  $U_d$  nochmal ab. Diese Vorgehensweise ist erforderlich, da während des Heizbetriebes der DMS durch Magnetostriktion zusätzlich gedehnt wird. Legen Sie dann das Gewicht 1kg. auf und messen nochmal bei 40 °C (hierzu nochmal kurz aufheizen)

Temperatur	ohne Gewicht	mit 1 kg Gewicht
Anfangstemp. = 23,2 °C	$U_d = 0 \text{ V}$	$U_d = -0,571 \text{ mV}$
Temp. = 40 °C	$U_d = 4 \mu\text{V}$	$U_d = -0,587 \text{ mV}$

### Halbbrücke

Ersetzen Sie den Festwiderstand im selben Zweig mit dem Zug-DMS schaltungstechnisch durch den Kompensations DMS auf der Zugseite (Z-komp-DMS). Wiederholen Sie die Messungen wie bei der Viertelbrücke. Sie müssen nicht den ganzen Abkühlvorgang abwarten, sondern können auch schon mit erhöhter Anfangstemperatur messen.

Temperatur	ohne Gewicht	mit 1 kg Gewicht
Anfangstemp. = 23,9 °C	$U_d = 0,000 \text{ mV}$	$U_d = -0,728 \text{ mV}$
Temp. = 40 °C	$U_d = -0,0242 \text{ mV}$	$U_d = -0,723 \text{ mV}$

### Vollbrücke

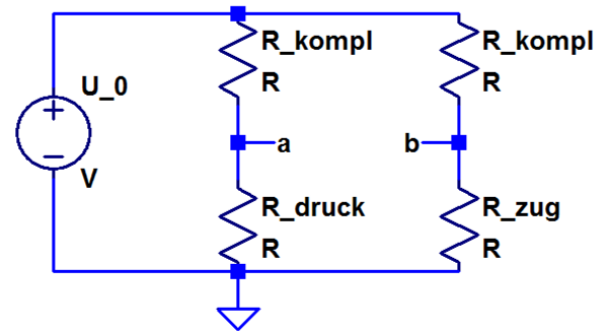
#### Vorbereitung:

Wegen der Querkontraktion des Biegestabes bei Belastung werden auch die Kompensations-DMS gedehnt. Wie verändern die jeweiligen Komp.-DMS dabei ihren Widerstand? Werden Sie hoch- oder niederohmiger? Skizzieren Sie ausgehend von dieser Erkenntnis eine Vollbrücke so, dass die Empfindlichkeit betragsmäßig maximal wird.

**Durchführung:**

Ersetzen Sie die anderen beiden Festwiderstände des Brückenrohrlings schaltungstechnisch so durch den Druck- und Druck-Kompensations-DMS, wie in der Vorbereitung ermittelt.

Gleichen Sie die Brücke ohne Last bei Raumtemperatur ab. Legen Sie 1 kg auf die Gewichthalterung und messen nochmal  $U_d$ .



ohne Gewicht:  $U_d = 0,0014 \text{ mV}$

mit 1kg Gewicht:  $U_d = -1,452 \text{ mV}$

Vermindern Sie die Spannung  $U_0$  nun so weit, dass sich bei 1kg Gewicht die Spannung  $U_d = 1 \text{ mV}$  ergibt. Überprüfen Sie den Abgleich ohne Gewicht, also dass dann weiterhin  $U_d = 0$  möglichst gut gilt. Messen Sie für ca. 10 verschiedene Gewichte zwischen 0 g und 1 kg die Spannung  $U_d$ . Bewerten Sie die Genauigkeit!

$U_0$  reduziert auf  $3,45 \text{ V}$

$U_d$  bei 1 kg:  $-1,006 \text{ mV}$

Masse m in g	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
$U_d$ in $\mu\text{V}$	-1,3	-7,8	-10,8	-14,8	-25,2	-55,1	-102,6	-206,7	-506,1	-1002

**Auswertung Viertelbrücke:**

Welchen Temperaturkoeffizienten  $\alpha_Z$  hat der Widerstand des aufgeklebten Zug-DMS?

$$\alpha_Z = \left( \frac{R_Z}{R_0} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\Delta\theta} = 0,188 \mu\text{C}^{-1}$$

Wie groß ist der Temperaturkoeffizient  $\alpha_{k_F}$  der Kraftempfindlichkeit  $k_F = dU_d/dF$ ?

$$\alpha_{k_F} = \frac{k_F(40^\circ\text{C}) - k_F(23^\circ\text{C})}{\Delta\theta \cdot k_F(23^\circ\text{C})} = 2,167 \cdot 10^{-3} \text{C}^{-1}$$

**Auswertung Halbbrücke:**

Wie groß ist der Temperaturkoeffizient  $\alpha_{k_F}$  der Kraftempfindlichkeit  $k_F = dU_d/dF$ ?

$$\alpha_{k_F} = \frac{k_F(40^\circ\text{C}) - k_F(23^\circ\text{C})}{\Delta\theta \cdot k_F(23^\circ\text{C})} = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{C}^{-1}$$

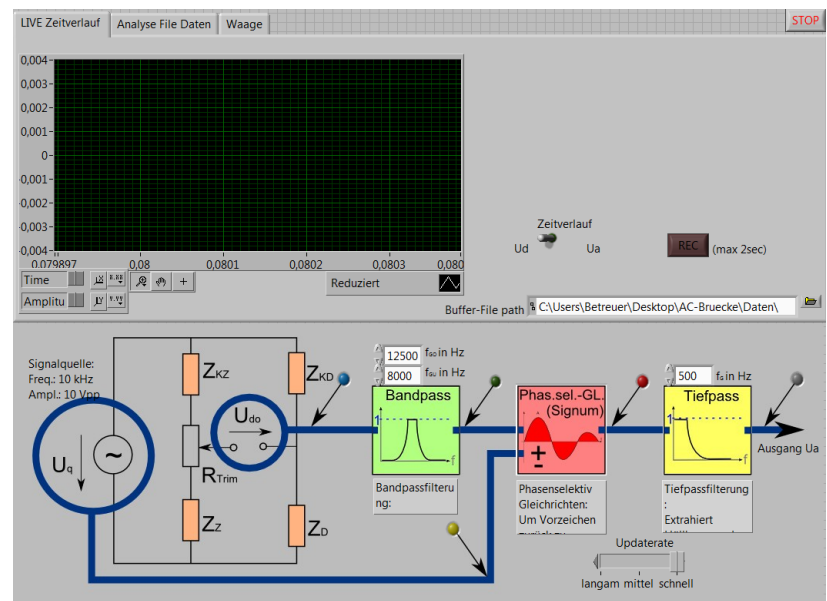
## 2.6 AC-Brücke mit Dehnungsmessstreifen

AC-Messbrücken, die im Vergleich zu DC-Messbrücken mit einer Wechselspannung gespeist werden, weisen hauptsächlich folgende Vorteile auf:

- Da keine DMM im Gleichspannungsbereich (langsam) eingesetzt werden, können auch dynamische Signale analysiert werden.
- Durch Wahl geeigneter Frequenzen der Speisespannung und Bandpassfilterung können Störungen besser ausgeschaltet werden.

Um das Vorzeichen des Messsignals nicht zu verlieren, müssen geeignete Maßnahmen (z.B. Phasenselektive Gleichrichtung + Tiefpassfilterung) ergriffen werden. Mit Hilfe eines fertigen VI's soll die Funktionsweise demonstriert werden.

Für die Messung wird der Connector-Block BNC-2110 vom Kabel zum PC getrennt und statt dessen wird das Kästchen AC-Messbrücke angeschlossen. Mit dem Flachbandkabel wird die Verbindung zur DMS-Anordnung mit Biegebalken hergestellt. Die AC-Brücke wird über den BNC-Anschluss mit dem Funktionsgenerator verbunden, der die Versorgungsspannung (Sinus, 10 kHz,  $U_{SS} = 10V$ ) bereit stellt. Laden Sie nun das AC-BridgeMain.vi und Sie erhalten nebenstehende Benutzeroberfläche, die weitgehend selbst erklärend ist.



**Vorbereitung:** Schauen Sie sich nochmal das Kapitel über phasenselektive Gleichrichtung (6.3) an.

### Durchführung zum Verständnis:

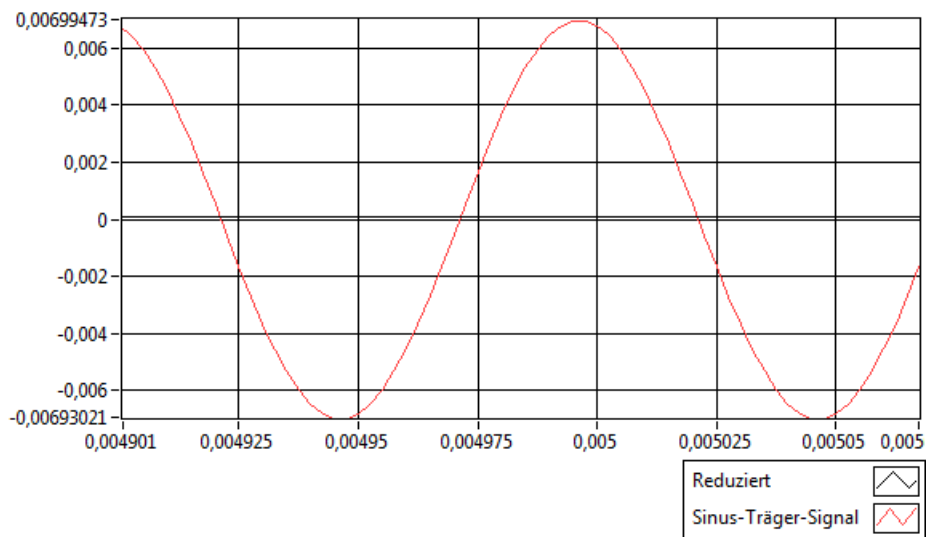
Nach dem Start des VI's müssen Sie zunächst im Buffer-File-Dialog einen gültigen Pfad (z.B. c:\Temp\TempTDMS\Demomessung) auswählen. Stellen Sie sicher, dass der gewählte Pfad auch existiert! Das File (hier Demomessung) wird dann automatisch generiert. Quittieren Sie dann mit ok. und schalten dann einmal kurz auf die Registerkarte „Waage“ und danach wieder zurück auf „LIVE Zeitverlauf“ um die Messung zu aktivieren.

Hinweis: Das Trägersignal (rot) ist um den Faktor 1000 kleiner dargestellt als die weiße Kurve. Die weiße Kurve stellt entweder  $U_d$  oder  $U_a$  dar und kann über den Schalter „Zeitverlauf“ ausgewählt werden.

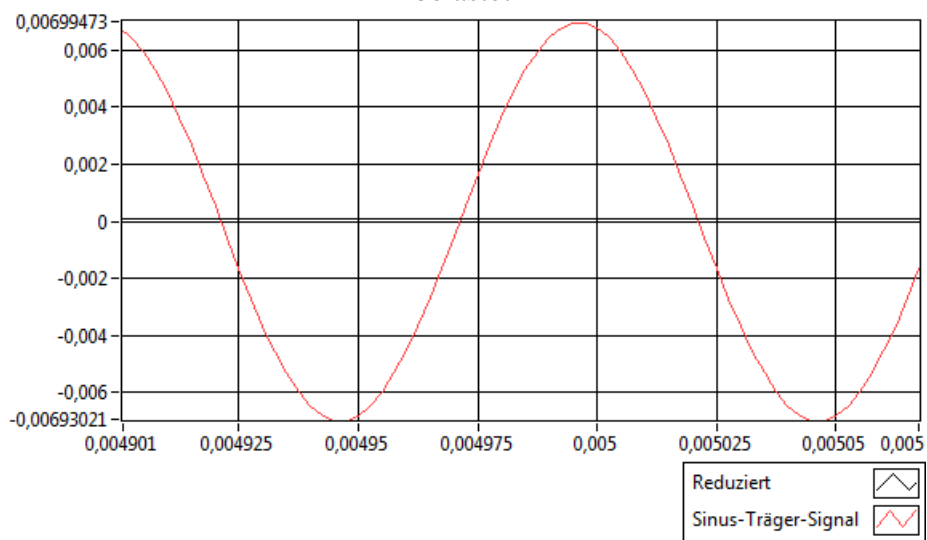
Wählen Sie über den Schalter „Zeitverlauf“ zunächst  $U_d$  aus, zoomen sinnvoll und drücken den Biegebalken leicht nach oben und nach unten. Beobachten Sie die Phasenlage zwischen Trägersignal und  $U_d$ . Nehmen Sie die Zeitverläufe ins Protokoll auf. Wie sieht der Verlauf von  $U_d$  ohne Filter aus? Zeitverlauf ebenfalls ins Protokoll aufnehmen!

Hinweis: Da Sie während des Programmlaufs nicht mit Copy und Paste arbeiten können, empfiehlt es sich entweder ein Simplified Image zu exportieren oder mit dem Snipping Tool zu arbeiten.

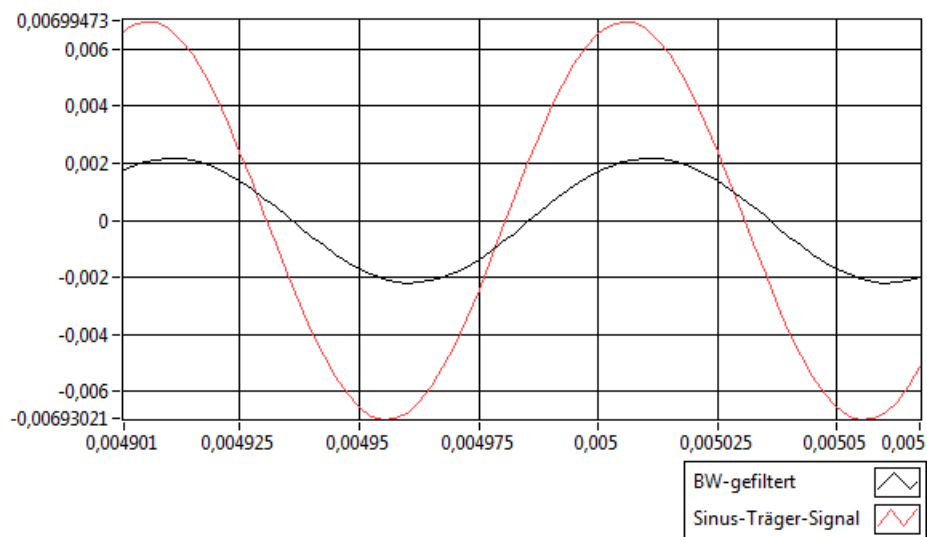
- Simplified Image: Rechtsklick auf Grafen → Export → Export Simplified Image → Export
- Snipping Tool: Start Button → sni.. bei ... durchsuchen eingeben → starten (und falls noch nicht geschehen mit re. Maust. an Startmenü oder Taskleiste anheften)



belastet



unbelastet



belastet  $u_d$

Schalten Sie nun auf  $U_a$ -Darstellung um und Testen Sie die Gleichrichtervarianten, wenn Sie den Biegestab auf und ab bewegen. Notieren Sie die Beobachtungen ins Protokoll:  
Keine Gleichrichtung:

Phasenselektive Gleichrichtung (Signum oder Sinus):

Normale Gleichrichtung:

Nachfolgend soll das dynamische Schwingverhalten des Biegestabes untersucht werden. Die Aufzeichnung erfolgt in der Registerkarte „LIVE Zeitverlauf“ und wird in „Analyse File Daten“ visualisiert. Für diese Analyse wird der abgetastete Zeitverlauf in dem File zwischengespeichert, welches beim Starten des VI's angegeben werden muss.

„Spannen“ Sie den Biegebalken mit einer Kraft, die maximal 1kg Gewicht entspricht und lassen ihn dann los so, dass er eine Eigenschwingung ausführt. Drücken Sie unmittelbar danach die Taste „REC“. Nun werden 2 s aufgezeichnet, gespeichert und dann wird automatisch in die Registerkarte „Analyse File Daten“ gesprungen, wo sie im linken Teil den gesamten Zeitverlauf und im rechten einen zoomten Ausschnitt sehen. Im zoomten Fenster können Sie durch Aktivierung der LED-ähnlichen, farbigen Schalter die jeweilige Größe zusätzlich darstellen. Durch klicken auf die jeweiligen Messglieder können diese ausgeschaltet bzw. modifiziert werden.

Ermitteln Sie die Frequenz der freien Schwingung und fügen Sie den entsprechenden Zeitverlauf nachfolgend ins Protokoll ein:

Probieren Sie die Features aus und vermerken Sie relevante Erkenntnisse, zu denen Sie gelangen.

Schalten Sie nun auf Waage um und stellen Sie die Amplitude der Versorgungsspannung so ein, dass 1mV der aufgelegten Masse 1kg entspricht. Da der Brückenabgleich nicht genau bei aufgehängter leerer Gewichthalterung vorgenommen wurde, muss die Kalibrierung iterativ vorgenommen werden.

Vorgehen:

1. Stellen Sie die Updaterate auf langsam (höchste Genauigkeit, da längste Mittelungszeit)
2. Hängen Sie die Gewichthalterung ohne Gewichte auf und drücken Sie dann die Taste „Tarieren“.
3. Stellen Sie das 1kg Gewicht auf die Halterung und ändern die Amplitude der Versorgungsspannung so ab, dass die Anzeige 1mV (0,001000) entspricht.
4. Nehmen Sie das Gewicht wieder runter und überprüfen Sie den Nullpunkt. Dieser kann sich wegen des unvollkommenen Nullpunktabgleichs wieder verstellt haben. Falls ja, drücken Sie erneut „Tarieren“
5. Wiederholen Sie Schritt 3. Und 4. so lange, bis Nullpunkt und Endpunkt bei 1kg stimmen.

Zum Test der Waage legen Sie nacheinander 10 verschiedene Massen auf und notieren die Anzeige in die Tabelle. Bewerten Sie die Genauigkeit und Stabilität der Waage im Vergleich zu der entsprechenden DC-DMS-Waage.

Masse m in g	200	500	1000	1500
$U_d$ in $\mu\text{V}$	-0,0002	-0,0005	-0,0010	-0,0015