# 7. Gleichstrom

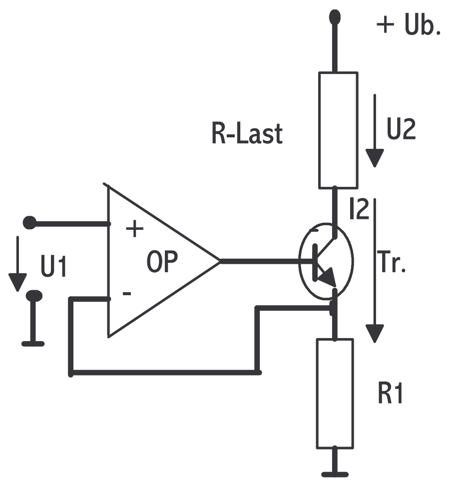
Jede Gleichspannungsquelle ($U_0$) mit einem sehr hohen Innenwiderstand ($R_i \gg R_{Last}$ ) stellt eine Konstantgleichstromquelle dar, da ihr Strom fast unabhängig von dem Lastwiderstand ist. Er wäre dann näherungsweise:

$$I_{const} = U_0 / R_i \qquad (7.1)$$

Die Gleichstrommessung wird meistens auf eine Spannungsmessung an einem Präzisionswiderstand, der vom zu prüfenden Strom durchflossen wird, zurückgeführt.

## 7.1 Gleichstromnormale

Als Spannungsquellen können Batterien, Akkumulatoren oder elektronische Gleichrichterschaltungen für Netzbetrieb verwendet werden. In der Praxis ist eine Stromquelle mit Vorwiderstand, der dem Innenwiderstand der gesamten Quelle entspricht, nicht sinnvoll. Denn bei einem eingeprägten Strom von zum Beispiel 100mA müßte mit einem $R_i$ von 100 kOhm die Spannung 10 kV betragen. Um dies zu umgehen verwendet man aktive Halbleiterbauelemente wie Transistoren, Feldeffekttransistoren oder Operationsverstärker, die einen differentiellen hohen Innenwiderstand in einer Regelschleife erzeugen. So kann mit normalen Betriebsspannungen eine gute Stromquelle aufgebaut werden. Als Beispiel soll hier eine von einem Operationsverstärker gesteuerte Transistorstromquelle vorgestellt werden.




Für den Ausgangsstrom gilt:

$$I_2 = (U_1 / R_1) * (1-1/B) \qquad (7.2)$$

Mit $U_1>0$ und $B > 100$ (statische Transistorstromverstärkung) kann der Ausgangsstrom leicht mit der Eingangsspannung $U_1$ und dem Steuerwiderstand $R_1$ eingestellt werden. Für $R_1$ muß ein niederohmiger Präzisionswiderstand verwendet werden, der möglichst keinen Temperaturkoeffizienten besitzt, da über ihn der gesamte Strom fließt. Eine Drift von Eingangsspannung oder Steuerwiderstand würde nämlich den Ausgangsstrom verändern. Für den Ausgangswiderstand (=Innenwiderstand der Quelle) gilt:

$$r_a = b * r_{CE} \qquad (7.3)$$

Für eine 100 mA Quelle läßt sich das folgende berechnen: $U_1$=1V mit Gleichung 7.2 => $R_1$ = 10 Ohm. Mit b = 150 (differentielle Stromverstärkung) und $r_{CE}$ = 1500 Ohm berechnet sich $r_a$ = 225 kOhm.

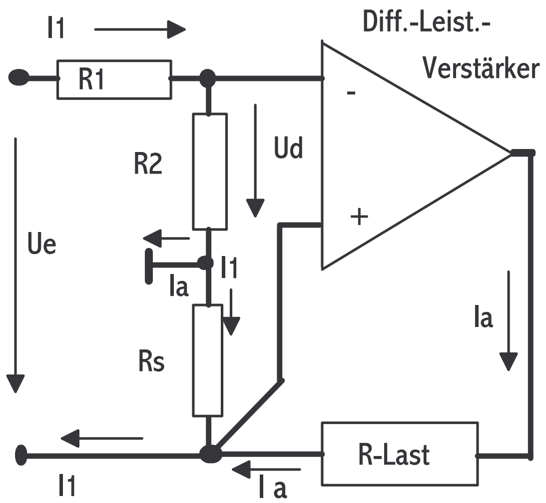
Durch Vergleich mit den Werten von oben ergibt sich ein klarer Vorteil für die elektronische Schaltung. Bei einem Lastwiderstand von 100 Ohm ergibt sich ein Spannungsabfall von 10V. Daher muß die Versorgungsspannung in diesem Fall > 12 V (10+1+1[$U_{CE}$]) sein, da sonst der Stromquelle die Spannung fehlt (Compliance Voltage). Die Spannung $U_1$, die ja sehr stabil sein muß, kann im einfachsten Fall über eine Widerstands- Zenerdiodenkombination mit einem Kondensator zur Pufferung von der Betriebsspannung abgeleitet werden, da der Eingang des Operationsverstärkers wegen seines hohen Widerstandes die Schaltung nicht belastet. Auf Grund des Innenwiderstandes der Stromquelle und des Lastwiderstandes entsteht ein Fehler beim Ausgangsstrom, der von dem Verhältnis der beiden Größen abhängt.

$$I_c = U_0 / (R_i + R_L) \qquad (7.4)$$

**Beispiel:** $R_i = 100$ kOhm; $U_0 = 10$ kV; $R_L = 0, 1, 100$ Ohm mit Gleichung 7.4 gilt: $I_c = 100, 99.999, 99.90$ mA je nach Last. Für das Widerstandsverhältnis: 100/100000 = 0.001<=> Abweichung beim Strom (nach unten).

Die hier vorgestellte Schaltung zeigt nur das Grundprinzip für eine einfache positive Gleichstromquelle. In der Präzisionsmeßtechnik werden aber auch negative und wechselnde Stromquellen benötigt. Ein Beispiel hierfür ist der Transkonduktanzverstärker, der ein Gleich- oder Wechselspannung in einen Gleich- oder Wechselstrom überführt. Er benötigt gegenüber einem üblichen Stromnormal intern keine Präzisionsspannungsquellen. An dem folgenden Bild eines vereinfachten Stromverstärkers soll das Prinzip erläutert werden.

Die Eingangsspannung $U_e$ wird erdfrei an die Schaltung angelegt und treibt dann über $R_L$ den Strom $I_A$. $I_1$ fließt über $R_1$, $R_2$ und $R_S$; $I_A$ über $R_L$ und $R_S$. Es ergeben sich die folgenden Gleichungen.




$$U_1 = I_1 * R_2 \qquad (7.5)$$

$$U_2 = (I_A - I_1) * R_S \qquad (7.6)$$

Da $U_D = 0$ wegen des Operationsverstärkers gilt.

$$U_1 = U_2 \quad (7.7) \qquad U_E = I_1 * R_1 \quad (7.8)$$

Gleichung 7.5 und 7.6 in 7.7 und nach $I_A$ aufgelöst:

$$I_A = I_1 * R_2 / R_S + I_1 * R_S / R_S \qquad (7.9)$$

Mit $I_1$ von Gleichung 7.8 in Gleichung 7.9 eingesetzt folgt die Endformel für den Ausgangsstrom in Abhängigkeit der veränderbaren Eingangsspannung und der festen Widerstände; $I_A$ ist proportional zu $U_E$ :

$$I_A = U_E * ( ( R_2 + R_S) / ( R_1 * R_S )) \qquad (7.10)$$

Die zwei vorgestellten Prinzipschaltungen sollten nur stellvertretend für alle Stromquellen den Aufbau von möglichen Stromquellen beschreiben. Es gelten für alle Stromquellen die beiden Regeln, daß sich die Unsicherheit des Stromwertes mit dem Stromanstieg und mit dem Anstieg der Frequenz erhöht. Dies wird auch in der Tabelle für die kommerziellen Geräte ersichtlich. Besonders häufig sind die Stromquellen versteckt in all den Multimetern zu finden, mit denen man Widerstände messen kann. Über den in den Prüfling eingeprägten bekannten Strom und den so erzeugten gemessenen Spannungsabfall, wird der Widerstand berechnet. Für die Erzeugung von Gleichstrom kommen in der Praxis entweder im einfachsten Fall Netzteile, die im Strommodus betrieben werden, Universalkalibratoren oder spezielle Stromgeber in zur Anwendung. Bei Netzteilen kann eine Genauigkeit des Stromes von 0.1% erreicht werden. Einfache Stromgeber wie von den Firmen Burster, Vahalla (Stromverstärker), und Analogic haben bis zu einem Endwert von 1 A eine Unsicherheit von 0.02%. Für die guten Universalkalibratoren, die in Kapitel 10 beschrieben werden, sehen die 90-Tage Spezifikationen etwa so aus:

| Bereich | Unsicherheit ±(ppm+A) |
|---|---|
| 220 µA | 50 + 10 nA |
| 2.2 mA | 40 + 10 nA |
| 22 mA | 40 + 100 nA |
| 220 mA | 50 + 1 µA |
| 2.2 A | 80 + 30 µA |
| 12 A | 200 +0.5 mA |

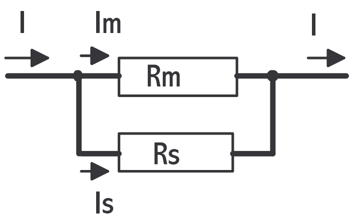
Für den oben beispielhaft beschriebenen Transkonduktanzverstärker von Fluke (5220A) gilt im Bereich 0A bis 20A die Unsicherheit bei Gleichstrom: ± (0.025 % + 1 mA). Hierin ist die meist zu vernachlässigende Gleichspannungsunsicherheit für die Eingangsspannung $U_E$ nicht enthalten. Eine Stromquelle, die aus einer Spannungsquelle und Innenwiderständen besteht, ist die Picoamperequelle 261 von Keithley. Mit ihr können Ströme von $1*10^{-4}$ bis $1*10^{-14}$ A eingeprägt werden, wobei der Fehler mit steigendem Strom wegen des kleiner werdenden Innenwiderstandes zunimmt.

## 7.2 Gleichstrommessung

Es sollen hier nur die heute allgemein üblichen Meßverfahren vorgestellt werden, also nicht die Strommessung mit Kompensator (und Widerstand), Gleichstromwandler (1kA bis 100kA), Hallgenerator (bis 100kA), Galvanometer oder Ladungsmesser. Es bleiben übrig die Direktmessung mit einem Meßwerk (z.B. Drehspulenmeßwerk) ohne oder mit Shunt, die Messung eines Spannungsabfalls an einem Meßwiderstand mit einem Voltmeter oder die Elektrometerschaltung für kleine Ströme. Bei einem Drehspulenmeßwerk fließt auf Grund der mechanischen Konstruktion ein im Vergleich zu den elektronischen Spannungsmessern großer Strom (z.B. 1mA). Es ist hier die Auslenkung des Zeigers (Drehmoment) direkt proportional mit dem von der Meßwerkspule durchflossenen Strom. Mit dem ohmschen Gesetz (U=R*I) sind die angelegte Spannung und der durchflossenen Strom über dem konstanten Innenwiderstand des Instruments verknüpft. Deswegen eignet sich die Meßwerk-spule auch für Spannungsmessungen und kann mit Parallelwiderständen (Shunt / Nebenwi-derstand) im Strommessbereich erweitert werden.

Der Shunt ist für die größeren Ströme keiner als der Meßwerkwiderstand. Es gilt nach der Abbildung:

$$I = I_m + I_s \quad (7.11) \qquad R_m/R_s = I_s/I_m \quad (7.12)$$




Die Gleichung 7.11 in 7.12 und nach $R_s$ aufge-löst ergibt den Shunt der für eine bestimmte Meßbereichserweiterung gebraucht wird.

$$R_s = (R_m * I_m) / (I - I_m) \qquad (7.13)$$

**Beispiel:** $R_m$=10 Ohm; $I_m$=10mA; I=3A => $R_s$=(10*0.01)/(3-0.01)=0.03344Ohm. Im Betrieb fließt durch den Shunt: $I_s=I-I_m$ => $I_s$ = 3-0.01=2.99A

Es ist zu beachten, daß durch den Spannungsabfall bei einer Strommessung im gesamten Stromkreis ein Spannungsfehler entsteht, der mit steigendem Gesamtinnenwiderstand des Strommessers immer größer wird. Deswegen wird angestrebt den Shuntwiderstand möglichst klein zu wählen und dafür ein emfindlicheres Meßwerk mit hohen Innenwiderstand auszusu-chen. Für die Präzisionsmeßtechnik sind die Drehspulenmeßgeräte heutzutage mit einer Eigenmeßunsicherheit von bestenfalls 0.1% uninteressant. Bei Verwendung der elektroni-schen Präzisionsvoltmetern mit hoher Auflösung im kleinsten Gleichspannungsbereich und einem Eingangswiderstand von etwa 10 GOhm sind erheblich bessere Meßmöglichkeiten gegeben. Entweder wird der Gleichstrom mit internen oder mit externen Shunt detektiert. Im ersten Fall wie beim Voltmeter HP 3458 lassen sich Messungen im Bereich 100nA bis 1A einfach durchführen. Im zweiten Fall muß ein Stromnormalwiderstand in den Meßkreis geschaltet werden und direkt an den Spannungsanschlüssen des Normalwiderstandes wird das Voltmeter angeschlossen. Obwohl natürlich weiterhin die Formel 7.13 gilt, kann $R_m$ gegenüber $R_s$ vernachlässigt werden, da fast der ganze Strom über den Shunt fließt. ( $I = U_M / R_s$ ) Die Meßspannung $U_M$ sollte möglichst klein sein, soweit dies das Voltmeter zuläßt, um den Meßkreis nicht zu sehr zu verfälschen. Um bei 1A im 100mV Meßbereich Vollausschlag zu haben muß der Shunt 0.1 Ohm betragen. Zwar läßt sich auch mit 0.01 Ohm messen, aber dann steigt die Unsicherheit der Messung auf Grund des Voltmeterbereichsfehlers (100mV) um den Faktor 10 an. Grundsätzlich müssen natürlich die Meßunsicherheiten des Voltmeters und die Werte des Nebenwiderstands, siehe auch das Kapitel über Widerstände, addiert werden. Außerdem müssen andere Effekte wie Störspannungen, Eingangswiderstand des Voltmeters im Verhältnis zum Shuntwiderstand und die Änderung des Widerstandswertes mit der Temperatur durch Erwärmung Berücksichtigung finden. Für ein praktische Beispiel genügen die Gleichungen:

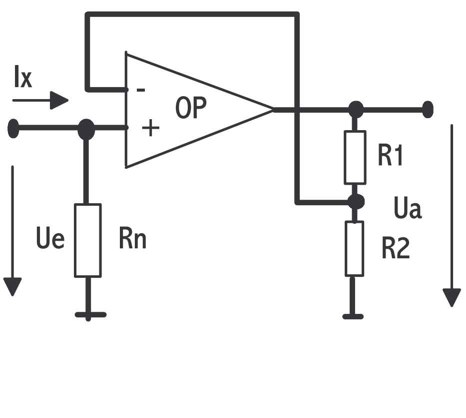
$$U = R * I \quad (7.14) \qquad R_g = (R_m * R_s) / (R_m + R_s) \quad (7.15)$$

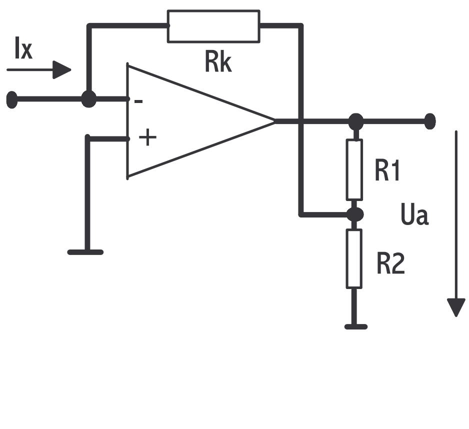
**Beispiel:** $R_m$=1MOhm ±0.01%; $U_m$=99.98 mV ±0.002%; $R_s$=100.045 Ohm ±0.002% => $R_s/R_m$=0.0001; für den Gesamtwiderstand mit Gleichung 7.15 gilt: $R_g$=100.0345 Ohm, ohne Berücksichtigung des Voltmetereingangswiderstands ($R_m=\infty$) wäre $R_g=R_s$, also um 0.0001 zu hoch (bei 100kOhm: 99.945 und 0.001). Mit Gleichung 7.14 gilt: $I=U_m/R_g$ => I=99.98mV/100.0345Ohm = 0.99945 mA (bei $R_m$=00: I=0.99935 mA)

Wie man an dem Beispiel sieht geht das Widerstandsverhältnis direkt in den Fehler des Meßergebnisses ein, wenn $R_m$ nicht berücksichtigt wird. Entsprechend wirkt sich auch die Unsicherheit der beiden Widerstände bei der richtigen Rechnung aus. Für den idealen Fall mit $R_s/R_m = 1*10^{-6}$ oder kleiner kann der Innenwiderstand des Voltmeters vernachlässigt werden, sodaß mit der Formel 7.14 mit dem wahren Wert des Widerstandes der Strom berechnet werden kann. Vorsicht bei AC-DC-Substitutionen, da der Voltmeterinnenwiderstand bei Wechselspannung meist erheblich kleiner als bei Gleichspannung ist.

Die Elektrometerschaltung, die Ähnlichkeit mit der Eingangsschaltung eines modernen Multimeters hat, besteht aus einem Operationsverstärker mit dem Strommesswiderstand je nach der Beschaltung im Eingangskreis oder im Rückkopplungszweig. Die Schaltung kommt hauptsächlich für Strommessungen im Bereich 1 mA bis 0.1 pA zum Einsatz. Es wird in den beiden Beispielen von einem idealen Operationsverstärker ausgegangen, dessen Eingangsstrom und Differenzspannung fast Null ist. Für die nicht invertierende Schaltung mit dem Eingang an + gilt:

$$U_e=R_n*I_x \quad (7.16) \qquad U_a=U_e*(R_1+R_2)/R_2 \quad (7.17) \qquad I_x=(U_a/R_n)*(R_2/(R_1+R_2)) \quad (7.18)$$



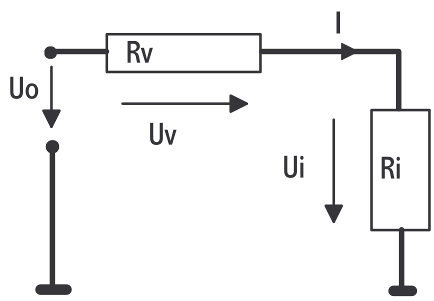



Die Wahl von $R_n$ wird von verschiedenen Punkten beeinflußt. Der Widerstand sollte wesentlich kleiner als der Eingangswiderstand des Operationsverstärkers sein und wesentlich größer als der Innenwiderstand der zu messenden Stromquelle. Bei dem invertierenden Verstärker liegt der Strommeßwiderstand im Rückkopplungszweig des Operationsverstärkers, der an Eingang - beschaltet ist.

$I_x = -U_a/R_k * R_2/(R_1+R_2)$ mit $R_k \gg R_2$ (7.19) $I_a = -U_a/R_k$ mit $R_1=0$ (7.20)

Hier ist die Wahl von $R_k$ von der Gleichspannungsdrift des Operationsverstärkers abhängig und daher darf der Widerstand nicht größer als der Innenwiderstand der Stromquelle gewählt werden. Der Innenwiderstand der Schaltung mit $Z_i = R_k / A_0$ bleibt wegen der hohen Leerlaufverstärkung $A_0$ sehr klein und beeinflußt das Meßergebnis im allgemeinen nicht. Eine weitere Möglichkeit kleine Ströme unter 100µA zu bestimmen ist über eine Spannungsquelle mit Vorwiderstand. Dazu wird zuerst der Innenwiderstand $R_i$ des Strommessers ausgemessen und dann der passende Vorwiderstand für eine entsprechende Gleichspannung $U_0$ und den gewünschten Strom gewählt.

$$I = \frac{U_0}{R_i+R_v} \qquad (7.21)$$




Die Gesamtunsicherheit dieses Meßverlaufs setzt sich aus den Einzelunsicherheiten der verschiedenen Parameter zusammen, wobei der Innenwiderstandsmessung besondere Bedeutung zukommt, da es hier nicht zu einer Überlastung des Einganges kommen darf, sodaß die Schutzschaltung des Strommessers die Messung verfälscht.

**Beispiel**: Mit HP 3458A; $R_i$=45 kOhm im 1µA Bereich gemessen; $R_v$=1.002 MOhm (Normal) => $R_{Summe}$=1.047 MOhm. aus GL. 7.21 => $U_0$=1.047 V. Eine Wahl von 1 V Nennspannung ist meistens sinnvoll.

Da es sich bei den beiden Widerständen immer um krumme Werte handelt, muß mit einem Spannungsnormal dann der gewünschte Strom eingestellt werden.

## 7.3 Messunsicherheitsberechnungen

Es gilt zwei Standardfälle mit Beispielen zu behandeln.

### 7.3.1 Kalibrierung von Gleichstromquellen

Bei dieser Messung wird der Stromwert eines Prüflings (z.B:Kalibrator) mit dem Meßnormal bestimmt. Die Messung erfolgt entweder über einen Spannungsabfall an einem Stromwiderstand (Shunt) oder direkt mit dem DVM (z.B.: HP3458). Es kommen daher zwei Modellgleichungen in Betracht.

Es gelten die folgenden neuen Abkürzungen:

$I_P$: Meßergebnis des Prüflings; Ergebnis der Messung mit Berechnung
$R_N$: Wert des Widerstandsnormals
$R_N^{\#}$: Gesamtgleichung für das Widerstandsnormal mit Meßunsicherheiten
$\delta u_{x1}$: Temperatureinfluß auf das Normal. $\delta u_{x1}$=kt*dT; Hierbei ist kt der Temperaturkoeffizient des Widerstands
$\delta u_{x2}$: Abgeschätzte zeitliche Inkonstanz (Drift/Alterung)
$\delta u_{x3}$: Messunsicherheit von 9975 und 9923 (Widerstandsmesseinrichtung)
$\delta Calext$: Kalibriermessunsicherheit der benötigten Normale bei der Dvm Kalibrierung

Für die Modellfunktion mit Shunt gilt (erste Tabelle):

$$I_P = \frac{A_N}{R_N^{\#}} + \delta Verf \quad (7.22)$$

Für die Bestimmung der Sensitivitätskoeffizienten (c) muß die Gleichung (7.22) nach allen veränderlichen Variablen abgeleitet werden.

$$\frac{\partial Ip}{\partial An} = \frac{1}{R_N^{\#}} = c1 \quad (7.23)$$

$$\frac{\partial I_P}{\partial R_N^{\#}} = \frac{-A_N}{(R_N^{\#})^2} = c2 \quad (7.24)$$

$$\frac{\partial I_P}{\partial \delta Verf} = 1 = c3 \quad (7.25)$$

Für die Modellfunktion mit Dvm gilt (zweite Tabelle):

$$I_P = A_N + \delta Mess + \delta Calext + \delta Auf + \delta Verf \quad (7.26)$$

Hier werden alle Sensitivitätskoeffizienten im Betrag eins.
(Shunt)

| **Größe ($X_i$)** | **Schätzwert ($x_i$)** | **Standardmeßunsicherheit $u(x_i)$** | **Ver-teilung** | **Sensitivitäts-koeffizient $c_i$** | **Unsicherheits-beitrag $u_{i(y)}$** |
|---|---|---|---|---|---|
| $R_N$ | 0,100 003 Ohm | $4*10^{-6}/2*0{,}1$ Ohm | Normal | $c_2=-100*C\$$ | $-2{,}00*10^{-5}$ A |
| $\delta u_{x1}$ | 0 | $1*10^{-6}/\sqrt{3}*0{,}1$ Ohm | Recht. | $c_2=-100*C\$$ | $-5{,}77*10^{-6}$ A |
| $\delta u_{x2}$ | 0 | $2*10^{-6}/\sqrt{3}*0{,}1$ Ohm | Recht. | $c_2=-100*C\$$ | $-1{,}15*10^{-5}$ A |
| $\delta u_{x3}$ | 0 | $1*10^{-6}/\sqrt{3}*0{,}1$ Ohm | Recht. | $c_2=-100*C\$$ | $-5{,}77*10^{-6}$ A |
| $A_N$ | 1,000043 V | $3*10^{-6}/\sqrt{6}*1$ V | Normal | $c_1=10/\mathrm{Ohm}$ | $1{,}22*10^{-5}$ A |
| $\delta Verf$ | 0 | $1*10^{-5}/\sqrt{3}*10$ A | Recht. | $c_3=1$ | $5{,}77*10^{-5}$ A |
| **$I_P$** | **10,00013 A** | - | - | - | **$6{,}385*10^{-5}$ A** |

C$=V/Ohm$^2$

Erweiterte Meßunsicherheit mit k=2: U=2*6,385*$10^{-5}$ A=1,3*$10^{-4}$ A

Vollständiges Meßergebnis: $I_P$=(10,00013 ± 0,00013) A

(DVM)

| Größe ($X_{i}$) | Schätzwert ($x_{i}$) | Standardmeßunsicherheit $u(x_{i})$ | Ver-teilung | Sensitivitäts-koeffizient $c_i$ | Unsicherheits-beitrag $u_{i(y)}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $A_N$ | 1,000034 $\mu$A | $1*10^{-6}/\sqrt{6}*1\ \mu A$ | Normal | $c_{1}=1$ | $4{,}08*10^{-13}$ A |
| $\delta Mess$ | 0 | $58*10^{-6}/\sqrt{3}*1\ \mu A$ | Recht. | $c_{2}=1$ | $3{,}35*10^{11}$ A |
| $\delta Calext$ | 0 | $35*10^{-6}/2*1\ \mu A$ | Normal | $c_{3}=1$ | $1{,}75*10^{-11}$ A |
| $\delta Auf$ | 0 | $5*10^{-7}/\sqrt{3}*1\mu A$ | Recht. | $c_{4}=1$ | $2{,}89*10^{-13}$ A |
| $\delta Verf$ | 0 | $1*10^{-7}/\sqrt{3}*1\mu A$ | Recht. | $c_{5}=1$ | $5{,}77*10^{-14}$ A |
| **$I_P$** | **1,000034 $\mu$A** | - | - | - | **$3{,}78*10^{-11}$ A** |

Erweiterte Meßunsicherheit mit k=2: $U=2*3{,}78*10^{-11}$ A$=7{,}56*10^{-11}$ A

Vollständiges Meßergebnis: $I_{P=(1{,}000034\ \pm\ 0{,}000076)\ \mu A}$

### 7.3.2 Kalibrierung von Gleichstrommessern

Zur Kalibrierung der Meßeinrichtung, zum Beispiel DVM, wird mit einem Normalquelle (z.B: Kalibrator-Fluke 5220) eine Messung durchgeführt. Aus sechs Anzeigen ist der Mittelwert 10,0058 A mit einer relativen Standardabweichung von $8*10^{-6}$ in einer Beispielsmessung ermittelt worden. So läßt sich mit der Modellgleichung die Unsicherheitstabelle erstellen.
Für die Modellfunktion gilt:

$$I_{Diff} = A_N - I_{CalN} + \delta Auf + \delta Verf \quad (7.27)$$

Die Ergebnisse für die alle Sensitivitätskoeffizienten sind im Betrag gleich eins.
Die Funktionsgleichung 7.27 auf dieses Beispiel angewendet, ergibt das folgende Messunsicherheitsbudget:

| Größe ($X_{i}$) | Schätzwert ($x_{i}$) | Standardmeßunsicherheit $u(x_{i})$ | Ver-teilung | Sensitivitäts-koeffizient $c_i$ | Unsicherheits-beitrag $u_{i(y)}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $A_N$ | 10,0058 A | $8*10^{-6}/\sqrt{6}*10$ A | Normal | $c_{1}=1$ | $3{,}26*10^{-5}$ A |
| $I_{CalIN}$ | 10,0000 A | $2{,}5*10^{-5}/\sqrt{3}*10$ A | Normal | $c_{2}=-1$ | $1{,}44*10^{-3}$ A |
| $\delta Auf$ | 0 | $0{,}5*10^{-5}/\sqrt{3}*10$ A | Recht. | $c_{3}=1$ | $2{,}89*10^{-5}$ A |
| $\delta Verf$ | 0 | $0{,}001 A/\sqrt{3}$ | Recht. | $c_{4}=1$ | $5{,}77*10^{-4}$ A |
| **$I_{Diff}$** | **0,0058 A** | - | - | - | **$1{,}55*10^{-3}$ A** |

Erweiterte Meßunsicherheit mit k=2: $U=2*1{,}55*10^{-3}$ A$=3{,}1*10^{-3}$ A

Vollständiges Meßergebnis: $I_{Diff=(0{,}0058\ \pm\ 0{,}0031)\ \mu A}$

Das Ergebnis sagt aus, dass das DVM um 0,0058 A bei einem Meßwert von 10A zu hoch mißt.