

# Quantenbasierte Messung und Erzeugung kleiner Stromstärken

Hansjörg Scherer\*, Dietmar Drung\*\*

## 1. Einleitung

Die elektrische Stromstärke (Größensymbol  $I$ ) hat eine metrologische Sonderstellung unter den elektrischen Größen, da ihre Einheit Ampere (Einheitensymbol A) die elektrische Basiseinheit im internationalen Einheitensystem (SI) ist. Die direkte Darstellung des Ampere entsprechend seiner noch gültigen SI-Definition beruht auf der Kraftwirkung zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern. Entsprechende experimentelle Realisierungen durch elektromechanische Apparaturen sind allerdings sowohl kompliziert als auch in ihrer Genauigkeit limitiert, sodass darauf beruhende Methoden in der Metrologie praktisch keine Rolle spielen [1]. Praktikable Methoden zur hochgenauen Stromstärkemessung und zur Stromerzeugung beruhen fast immer auf indirekten Verfahren. Meist macht man sich dabei zunutze, dass die Stromstärke mit den elektrischen Größen Spannung und Widerstand über das Ohm'sche Gesetz verknüpft ist und führt die Stromstärke auf diese beiden Größen zurück. Von besonderem Vorteil ist, dass für diese Größen bereits elektrische Quantennormale zur Verfügung stehen, welche die Reproduzierung der entsprechenden Größen unter Rückführung auf die Fundamentalkonstanten  $h$  (Planck'sches Wirkungsquantum) und  $e$  (Elementarladung) mit unübertroffener Genauigkeit erlauben. Auf diese beiden bereits metrologisch etablierten Quantennormale – das Quanten-Spannungsnormale beruhend auf dem Josephson-Effekt und das Quanten-Widerstandsnormale beruhend auf dem Quanten-Hall-Effekt – wird in anderen Artikeln dieses Hefts ausführlich eingegangen.

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf ein neuartiges Instrument, welches die rückgeführte Messung und Erzeugung von Stromstärken bis hinauf zu  $5 \mu\text{A}$  mit bislang unerreichter Genauigkeit erlaubt. Der damit abgedeckte Bereich kleiner elektrischer Stromstärken (beziehungsweise hochgenauer Messungen und Kalibrierungen in diesem Bereich) ist von wachsender Bedeutung: Neben der Forschung auf dem Gebiet elektrischer Nanostrukturen inklusive Einzelelektronentransport-Schaltungen [2] besteht Bedarf in

der Medizinmesstechnik (beispielweise in Dosimetrie und Brachytherapie), in der Umweltmesstechnik (etwa für Staubkonzentrations- oder Immissionsmessungen), aber auch in der modernen Halbleiterindustrie (Mikro- und Nanoelektronik) oder in der modernen Leuchtmittelindustrie. Die vorgestellten Methoden beruhen auf einem neuartigen handlichen Instrument, einem ultrastabilen rauscharmen Stromverstärker (engl. *Ultrastable Low-noise Current Amplifier*, abgekürzt ULCA), welcher als Strom-Spannungswandler mit überraschenden Eigenschaften ohne den direkten Einsatz von Tieftemperaturmethoden eingesetzt wird [3, 4]. Sein hochstabiler Transferkoeffizient wird dazu rückgeführt auf den Quanten-Hall-Effekt „quantengenau“ kalibriert, und das Spannungssignal wird mit einem auf das Josephson-Spannungsnormale rückgeführten Voltmeter gemessen.

Prinzipiell eröffnet die für die nahe Zukunft geplante Revision des SI mit der Festlegung eines exakten Werts für die Elementarladung  $e$  die Möglichkeit, auf die Frequenz  $f$  rückgeführte Stromstärken gemäß der Beziehung  $I = e \cdot f$  darzustellen [1]. Die dazu notwendigen, in der Entwicklung befindlichen Einzelelektronenpumpen sind jedoch aufgrund der sehr hohen Komplexität bezüglich Fertigungstechnologie und Betrieb noch nicht für den praktischen metrologischen Einsatz ausgereift [5–8]. Die rückgeführte Erzeugung von sub-Nanoampere-Strömen wurde an Metrologieinstituten bislang vorzugsweise mit einem Verfahren durchgeführt, welches auf Kondensatoraufladung mittels einer Spannungsrampe beruht [9–11]. Dabei wurden relative Unsicherheiten von bestenfalls etwa  $10 \mu\text{A}/\text{A}$  erreicht [12], wobei die Genauigkeit durch den Unsicherheitsbeitrag der Frequenzabhängigkeit der Kondensatorkapazität limitiert ist [13]. Das ULCA-Konzept vermeidet diese prinzipielle Begrenzung. Neben weiteren substanziellen praktischen Vorteilen ermöglicht der ULCA die Erzeugung und Messung kleiner Stromstärken mit Unsicherheiten, die um bis zu etwa zwei Größenordnungen kleiner sind als die herkömmlicher Verfahren. Konzept, Charakteristika, Einsatzmöglichkeiten und Ergebnisse erster Anwendungen des ULCA werden im Fol-

\* Dr. Hansjörg Scherer, Arbeitsgruppe 2.61 „SET, Stromstärke und Ladung“, E-Mail: hansjoerg.scherer@ptb.de

\*\* Dr. Dietmar Drung, Fachbereich 7.2 „Kryophysik und Spektrometrie“, E-Mail: dietmar.drung@ptb.de

genden vorgestellt. Alle in diesem Artikel genannten Spezifikationen und Kennzahlen beziehen sich auf die sogenannte „Standardversion“ des ULCA, welche seit Sommer 2016 unter Lizenzvergabe durch die Magnicon GmbH hergestellt und vertrieben wird [14].

## 2. ULCA-Konzept

Der ULCA wurde entwickelt im Rahmen des im Jahr 2015 abgeschlossenen europäischen Metrologieforschungsprojektes „Quantum Ampere“ zum Thema Einzelelektronen-Stromquellen [2]. Ursprünglicher Einsatzzweck des ULCA war die hochgenaue rückgeführte Verstärkung und Messung von elektrischen Stromstärken der Größenordnung 100 pA. Das Prinzip beruht

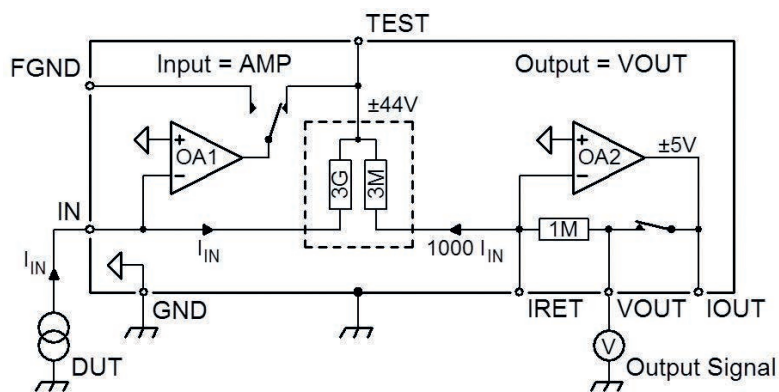


Bild 1: Grundschemata des ULCA für den Betrieb im Elektrometermodus mit Strom-Spannungswandlung im Stromstärkebereich bis 5 nA. Der Eingangsstrom  $I_{IN}$  wird mittels des 3-GΩ/3-MΩ-Widerstandsnetzwerks und OA1 1000-fach verstärkt. Die Ausgangsstufe wandelt den verstärkten Strom über einen internen 1-MΩ-Referenzwiderstand und OA2 in eine Ausgangsspannung um (*Output Signal*). Ausgangsspannungsbereiche sind  $\pm 44$  V für OA1 und  $\pm 5$  V für OA2. Das interne Referenzpotential (offene Dreiecke) ist mit dem Gehäusepotential des ULCA über einen Kurzschlussstecker am GND-Anschluss verbunden. Das Spannungs-Ausgangssignal *Output Signal* ist gleich  $I_{IN} \cdot A_{TR}$ .

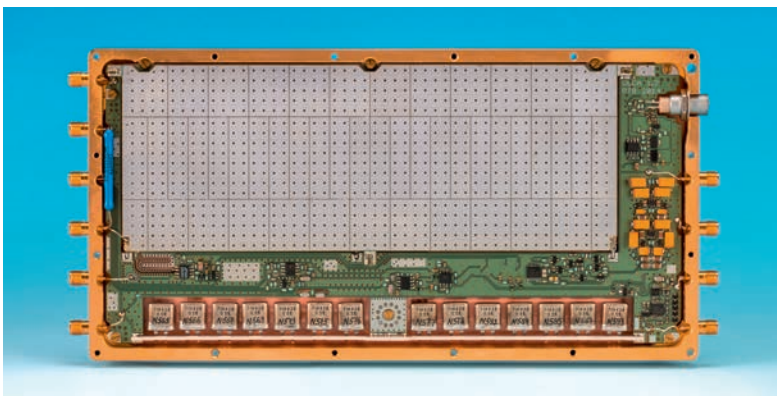


Bild 2: Blick in das geöffnete Kupfergehäuse eines ULCA-Prototyps mit 3-GΩ/3-MΩ-Widerstandsnetzwerk in der Eingangsstufe und 1-MΩ-Widerstand in der Ausgangsstufe (also entsprechend der ULCA-Standardversion) aus dem Jahr 2014. Das Widerstandsnetzwerk der Eingangsstufe (nicht sichtbar) befindet sich unterhalb der silbernen Guardplatine. Der 1-MΩ-Widerstand der Ausgangsstufe ist aufgebaut aus 14 Metallfolienwiderständen, die im Bild oberhalb des unteren Gehäuseendes sichtbar sind. Anschlüsse für die Ein- und Ausgänge des ULCA sind die SMA-Konnektoren (im Bild an der linken und rechten Gehäusesseite).

auf einer Verstärkung des Eingangsstromes mit nachgeschalteter Strom-Spannungswandlung [3]. In Verbindung mit einer externen Spannungsquelle ist der ULCA ebenfalls für die rückgeführte Generierung elektrischer Ströme geeignet. Der bei Stromstärkemessung und -erzeugung jeweils abgedeckte Bereich ist  $\pm 5 \mu\text{A}$ . Der Aufbau des als Transresistenz-Stromverstärker konzipierten Instruments folgt einem zweistufigen Konzept, wobei die erste Stufe (Eingangsstufe) die Verstärkung des Eingangsstromes um einen Faktor  $G_I = 1000$  bewirkt und durch die zweite Stufe (Ausgangsstufe) die Strom-Spannungswandlung über einen Widerstand des Nennwertes  $R_{IV} = 1 \text{ M}\Omega$  erfolgt. Folglich ist die gesamte effektive ULCA-Transresistenz  $A_{TR} = G_I \cdot R_{IV}$  und beträgt nominell 1 GΩ.

Das Grundschemata des ULCA in der Konfiguration für den Betrieb im Elektrometermodus ist in Bild 1 gezeigt. Schlüsselkomponente des ULCA ist das spezielle 3-GΩ/3-MΩ-Widerstandsnetzwerk der Eingangsstufe, bestehend aus etwa 3000 einzelnen NiCr-Dünnschicht-Chipwiderständen mit je 2 MΩ, welches in Verbindung mit Operationsverstärker OA1 den Eingangsstrom  $I_{IN}$  1000-fach verstärkt. Die Ausgangsstufe zur Strom-Spannungswandlung umfasst einen 1-MΩ-Referenzwiderstand, aufgebaut aus mehreren gekapselten Präzisions-Metallfolienwiderständen in Verbindung mit OA2. OA1 und OA2 sind speziell entwickelte Schaltkreise bestehend aus mehreren monolithischen Operationsverstärkern. Sie zeichnen sich aus durch niedriges Eingangsrauschen, sehr hohe Leerlaufverstärkung von deutlich höher als  $10^9$  und Eingangswiderstände  $< 1 \Omega$ .

Bild 2 zeigt das Foto eines ULCA-Prototyps. Zur Gewährleistung hoher Temperaturstabilität ist das Gehäuse aus massivem Kupfer gefertigt. Das 3-GΩ/3-MΩ-Widerstandsnetzwerk ist beidseitig durch Guardplatinen abgedeckt. Der interne 1-MΩ-Referenzwiderstand besteht aus einer vom Hersteller selektierten Auswahl von 14 einzelnen, hermetisch gekapselten Metallfolienwiderständen, im Bild sichtbar oberhalb des unteren Gehäuseendes. Das modulare Platinendesign gestattet eine einfache separate Umrüstung des ULCA mit Widerstandsnetzwerken oder Referenzwiderständen.

Die Spannungsversorgung erfolgt über eine separate Batteriebox. Diese enthält zwei 12-V-Akkus, welche automatisch intermittierend zwischen Lade- und Versorgungszustand geschaltet werden und damit einen unterbrechungsfreien und gleichzeitig vom Versorgungsnetz galvanisch entkoppelten Betrieb über praktisch unbegrenzt lange Zeiträume ermöglichen. Der maximale Betriebsstrom des ULCA beträgt nur 11 mA. Die entsprechend niedrige Verlustleistung bewirkt eine nur geringfügige Erwärmung der ULCA-Elektronik gegenüber der Umgebung. Neben der Minimierung der Eigen-

erwärmung wurde beim ULCA-Design besonders auf Konstanz der Verlustleistung, d. h. insbesondere auf Unabhängigkeit von der Signalstärke geachtet, um Nichtlinearitäten durch thermisches Übersprechen zwischen Eingangs- und Ausgangsstufe zu vermeiden. Dadurch wurde sichergestellt, dass die durch die Verstärkerstufen OA1 und OA2 separat erreichten hohen Verstärkungen auch im praktischen Betrieb mit dem vollständig assemblierten Gerät realisiert werden [15].

Im Normalbetrieb, also im Einsatz als Elektrometer, fungiert der ULCA effektiv als Strom-Spannungswandler eines Eingangstroms  $I_{IN}$ . Im *Voltage-Output-Modus*, gezeigt in Bild 1, wird der interne 1-M $\Omega$ -Widerstand im Rückkoppelkreis der zweiten Verstärkerstufe OA2 genutzt (Output = VOUT), also mit der effektiven totalen Transresistanz  $A_{TR} = 1 \text{ G}\Omega$ . Das mit einem Voltmeter gemessene Spannungs-Ausgangssignal (*Output Signal*) ist  $I_{IN} \cdot A_{TR}$ . Im *Current-Output-Modus* (Output = IOUT), gezeigt in Bild 3, wird dagegen zur Strom-Spannungswandlung ein externer Normalwiderstand  $R_{ext}$  genutzt.

Das Design des Standard-ULCA erlaubt die Wahl des Widerstandes  $R_{ext}$  im Bereich zwischen praktisch null und 100 M $\Omega$ . Auf diese Weise lassen sich effektive Transresistenzen bis hinauf zu 100 G $\Omega$  realisieren. Außerdem kann durch Einsatz eines externen Normalwiderstands, der dem eingebauten 1-M $\Omega$ -Metallfolienwiderstand qualitativ überlegen ist, die Messperformance weiter verbessert werden. Die Umschaltung zwischen den unterschiedlichen Betriebsmodi (Output = VOUT oder IOUT) erfolgt mittels ULCA-interner Schalter, die über Kippschalter an der Batteriebox geschaltet werden.

Der ULCA steht in ein- oder zweikanaliger Ausführung zur Verfügung, wobei die beiden identischen Kanäle der letzteren Variante komplett unabhängig voneinander sind und mit separaten Batterieboxen betrieben werden. Zur Verfolgung der internen Gerätetemperatur ist jeder ULCA-Kanal mit einem Temperatursensor (mit analogem Spannungsausgang *proportional to absolute temperature*, PTAT) ausgestattet. Der typische Transferkoeffizient des Sensors beträgt 1,9 mV/K und wird bei der Initialkalibrierung des ULCA bestimmt. Bei Anwendungen mit besonders hohen Genauigkeitsanforderungen kann damit eine Korrektur von Temperatureffekten über den zuvor kalibrierten Temperaturkoeffizienten von  $A_{TR}$  durchgeführt werden. Weitere Details zum ULCA-Konzept und -Design sind beschrieben in [3].

Fotos der ausentwickelten und kommerzialisierten Version eines zweikanaligen Standard-ULCA mit leitfähig beschichtetem Kupfergehäuse und einer Batteriebox zeigt Bild 4. Der Transportkoffer mit ULCA-Grundgerät und zugehörigem Equipment ist auf dem Foto in Bild 5 abgebildet.

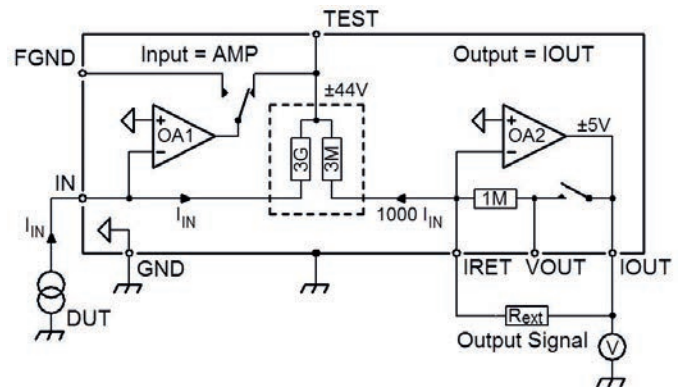


Bild 3: Schema des ULCA-Betriebs im Elektrometermodus mit Strom-Spannungswandlung über einen externen Rückkoppelwiderstand  $R_{ext}$ . (zum Vergleich siehe Bild 1)



Bild 4: Links: Fotos eines zweikanaligen Standard-ULCA mit leitfähig beschichtetem Kupfergehäuse (Vorder- und Rückseite mit SMA-Konnektoren). Rechts: Zugehörige Batteriebox (BatBox) zur unterbrechungsfreien elektrischen Versorgung eines ULCA-Kanals und zur Konfigurierung der Betriebsmodi über zwei Kippschalter. Bezugsquelle: Magnicon GmbH (Hamburg) [14].



Bild 5: ULCA mit Zubehör in Lieferverpackung (Bezugsquelle: Magnicon GmbH (Hamburg) [14]). In der als Transportkoffer gestalteten Box enthalten sind ULCA-Grundgerät (ein- oder zweikanalig), Batteriebox(en) und zugehörige Netzteil(e), Verbindungskabel inklusive rauscharme Anschlusskabel für den ULCA-Stromeingang, Tiefpass und Spannungsteiler in SUCO-Boxen, Temperatur-Datenlogger, Box mit weiterem Zubehör (inklusive SMA-BNC-Adaptoren) sowie eine Bedienungsanleitung.

Tabelle 1:  
Die wichtigsten ULCA-Kennzahlen und -Spezifikationen auf einen Blick. Messunsicherheiten sind Standardunsicherheiten ( $k = 1$ ). Auf die unterschiedlichen Eingangsbereichsbereiche beziehungsweise die Betriebsmodi *normal mode* und *extended mode* wird in Abschnitt 5 eingegangen.

ULCA-Spezifikationen (Standardversion)	
Effektive Transresistenz $A_{TR}$	1 G $\Omega$ (1000 $\times$ 1 M $\Omega$ )
Temperaturkoeffizient von $A_{TR}$	0,2 $\mu\Omega/\Omega$ pro Kelvin (typisch)
Langzeitstabilität von $A_{TR}$	besser als 5 $\mu\Omega/\Omega$ pro Jahr
Kurzzeitfluktuationen von $A_{TR}$	0,1 $\mu\Omega/\Omega$ über eine Woche (typisch)
Eingangsbereich $I_{IN}$	$\pm 5$ nA (,normal mode'), $\pm 5$ $\mu$ A (,extended mode')
Eingangsimpedanz	$< 1$ $\Omega$ (,normal mode'), $< 1$ m $\Omega$ (,extended mode')
Eingangsrauschen ( $f < 1$ Hz)	2,4 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
1/f-Eckfrequenz	$< 1$ mHz
Einschwingverhalten	Abweichung vom Endwert $< 0,1$ $\mu$ A/A nach etwa 3 s
Kalibrierunsicherheit von $A_{TR}$	$< 0,1$ $\mu\Omega/\Omega$ (bei Kalibrierung mit PTB-CCCs)

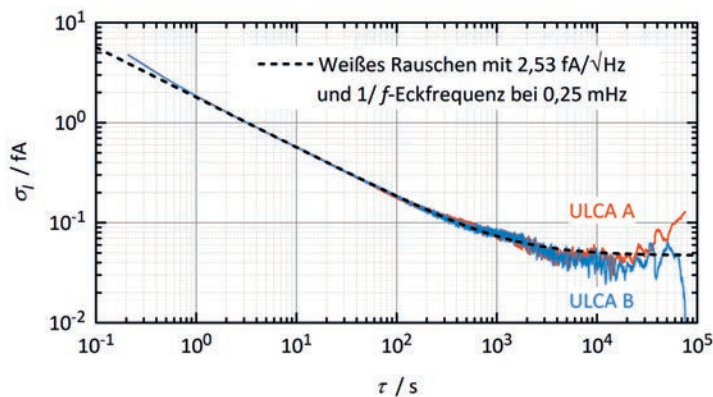


Bild 6: Allan deviation-Plot des Eingangsbereichsrauschens von zwei Standard-ULCAs. Die gestrichelte Linie entspricht weißem Rauschen mit 2,53 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$  (Rauschbeiträge von ULCA und Voltmeter) und einer 1/f-Eckfrequenz bei 0,25 mHz (entsprechend  $\tau = 4000$  s).

Tabelle 2:  
Auflistung der erreichbaren Messunsicherheiten des Standard-ULCA im Elektrometereinsatz gemäß Bild 3 in Abhängigkeit von der Eingangsstromstärke und der Messzeit. Die berechneten Werte für die Messzeiten beruhen auf dem effektiven Eingangsbereichsrauschen von 2,4 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ , wobei wegen zu verwerfender Transienten (z. B. nach Stromumpolungen) von einer 80-prozentigen Datennutzung ausgegangen wurde. Messunsicherheiten sind Standardunsicherheiten ( $k = 1$ ). Die angegebenen Ausgangsspannungen entsprechen dem spannungsgewandelten ULCA-Ausgangssignal (Output Signal in Bild 3).

Stromstärke $I_{IN}$	Relative (absolute) Messunsicherheit	Gesamtmesszeit für „ $I_{IN} \pm$ “ („ $I_{IN}$ an/aus“)	Ausgangsspannung
1 nA	1 $\mu$ A/A (1 fA)	$< 1$ min	1 V
	0,1 $\mu$ A/A (100 aA)	6 min (24 min)	
100 pA	1 $\mu$ A/A (100 aA)	6 min (24 min)	100 mV
	0,1 $\mu$ A/A (10 aA)	10 h (40 h)	
10 pA	10 $\mu$ A/A (100 aA)	6 min (24 min)	10 mV
	1 $\mu$ A/A (10 aA)	10 h (40 h)	
1 pA	10 $\mu$ A/A (10 aA)	10 h (40 h)	1 mV

### 3. ULCA-Kennzahlen und Charakteristika

Besonders wichtige Kennzeichen des ULCA sind – entsprechend der Reihung im Namen – zum einen höchste Stabilität der über den gesamten Aussteuerbereich praktisch konstanten Transresistenz [16] und zum anderen ein niedriger Rauschpegel. Darüber hinaus besitzt der ULCA noch zahlreiche andere hervorragende Eigenschaften und Alleinstellungsmerkmale, die hier in kurzer Form resümiert sind (siehe auch Tabelle 1). Alle im Folgenden genannten Messunsicherheiten sind Standardunsicherheiten ( $k = 1$ ). Weitere Details und Informationen sind in ausführlicher Form dargestellt in [3].

Wie im folgenden Abschnitt 4 näher diskutiert wird, beträgt die Änderung der effektiven totalen Transresistenz  $A_{TR}$  des Standard-ULCA über den Zeitraum eines Jahres typischerweise nur wenige  $\mu\Omega/\Omega$ . Damit ist der ULCA kommerziell erhältlichen *state-of-the-art*-Kleinstrominstrumenten (Quellen oder Meter) um rund zwei Größenordnungen überlegen. Kurzzeitfluktuationen von  $A_{TR}$  über den Zeitraum von einer Woche sind typischerweise kleiner als 0,1  $\mu\Omega/\Omega$ . Der Temperaturkoeffizient von  $A_{TR}$  liegt deutlich unterhalb von 1  $\mu\Omega/\Omega$  pro Kelvin, und die Eingangsimpedanz des ULCA ist kleiner als 1  $\Omega$  [15]. Das effektive Eingangsbereichsrauschen im Frequenzbereich unterhalb von  $f = 1$  Hz beträgt 2,4 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ , und die 1/f-Eckfrequenz ist mit  $< 1$  mHz extrem niedrig (Bild 6).

Der Eingangsbereich des Standard-ULCA beträgt  $\pm 5$  nA im sogenannten *normal mode* und  $\pm 5$   $\mu$ A im *extended mode*; auf diese beiden unterschiedlichen Betriebsmodi wird in Abschnitt 5 näher eingegangen. Das Einschwingverhalten des ULCA ist hervorragend: Nach nur etwa 3 s ist die relative Abweichung vom Endwert kleiner 0,1  $\mu$ A/A [3]. Die Kalibrierung der Transresistenz  $A_{TR}$  kann, wie in Abschnitt 4 dieses Artikels dargestellt, in der PTB innerhalb eines Tages mit einer kombinierten Unsicherheit von deutlich weniger als 0,1  $\mu\Omega/\Omega$  durchgeführt werden.

Tabelle 2 beleuchtet die Elektrometereigenschaften des ULCA in dem für viele praktische Zwecke interessanten Stromstärkebereich von 1 pA bis 1 nA. Aufgelistet sind in Abhängigkeit von der Messzeit erreichbare Messunsicherheiten. Die beiden unter „Messzeit“ jeweils angegebenen Werte beziehen sich dabei auf zwei unterschiedliche Methoden, die bei Strommessungen zur Unterdrückung von Offsetstrom beziehungsweise -drift angewendet werden: Der erste Wert entspricht jeweils einer Messung, bei der der Eingangsbereichsstrom  $I_{in}$  wiederholt umgepolt wird ( $I_{in} \pm$ ), der zweite dagegen einer Messung, bei der der Eingangsbereichsstrom  $I_{in}$  wiederholt an- und ausgeschaltet wird ( $I_{in}$  an/aus). Zu verwerfende

Transienten, die gegebenenfalls durch Signalumschaltungen auftreten, sind dabei durch eine Verringerung der in der Gesamtmesszeit akquirierten Daten berücksichtigt: In Tabelle 2 wird von einer 80-prozentigen Datennutzung (also 20 % verworfenen Messdaten) ausgegangen. Die angegebenen Ausgangsspannungen entsprechen dem spannungsgewandelten ULCA-Ausgangssignal (*Output Signal* in Bild 3).

Die exzellenten Elektrometereigenschaften spiegeln sich in den geringen Messunsicherheiten beziehungsweise kurzen Messzeiten wider: Beispielsweise ist die hervorragend kleine Messunsicherheit von nur  $1 \mu\text{A}/\text{A}$  bei  $100 \text{ pA}$  Eingangsstrom (vgl. dazu [12]) auch bei ungünstigen Messbedingungen ( $I_{\text{in}}$  an/aus) innerhalb von weniger als einer halben Stunde Gesamtmesszeit erzielbar. In diesem Zeitraum spielen Änderungen der ULCA-Transresistenz durch Kurzzeitfluktuationen oder Drift praktisch keine Rolle.

#### 4. Kalibrierung des ULCA mittels Kryostromkomparator

Kalibrierungen des ULCA werden in der PTB auf höchstem Präzisionsniveau mit einem eigens für diesen Zweck entwickelten Kryostromkomparator-System durchgeführt [4], welches in Bild 7 gezeigt ist. Das Prinzip des Kryostromkomparators (engl. *cryogenic current comparator*, abgekürzt CCC) ermöglicht die Darstellung von Stromstärkeverhältnissen mit fundamentaler Genauigkeit und damit auch die hochgenaue Rückführung von Widerständen auf Normalwiderstände beziehungsweise auf den Quanten-Hall-Widerstand. Der an der PTB für die ULCA-Kalibrierung entwickelte und routinemäßig eingesetzte 14-bit-Komparator besitzt insgesamt mehr als 18 000 Windungen, die in Spulenpakete mit binärer Windungszahl aufgeteilt sind.

Eingangs- und Ausgangsstufe eines ULCA werden separat in zwei Schritten kalibriert, so wie in Bild 8 schematisch gezeigt. Bei der Kalibrierung der stromverstärkenden Eingangsstufe wird der Verstärkungsfaktor  $G_I$  mit dem Nominalwert 1000 mit einem Windungszahlverhältnis des Stromkomparators von  $N_1:N_2 = 16\,000:16$  bei entsprechenden Stromstärken  $I_1:I_2 \approx N_2:N_1 \approx 13 \text{ nA}:13 \mu\text{A}$  kalibriert. Die Kalibrierung der Ausgangsstufen-Transresistenz  $R_{IV}$  mit dem Nominalwert  $1 \text{ M}\Omega$  erfolgt durch Vergleich mit einem Normalwiderstand  $R_1$ , der auf den Quanten-Hall-Widerstand rückgeführt ist. Beide Kalibrierschritte können mit dem 14-bit-CCC innerhalb eines Tages durchgeführt werden.

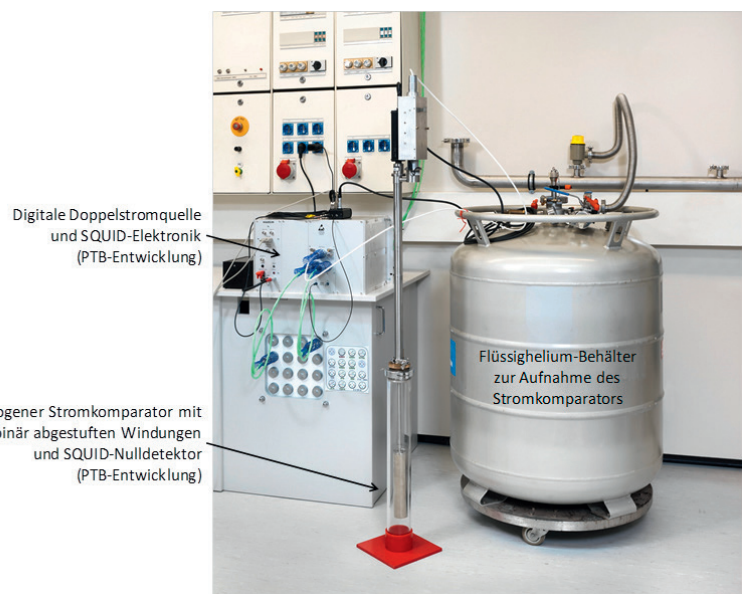
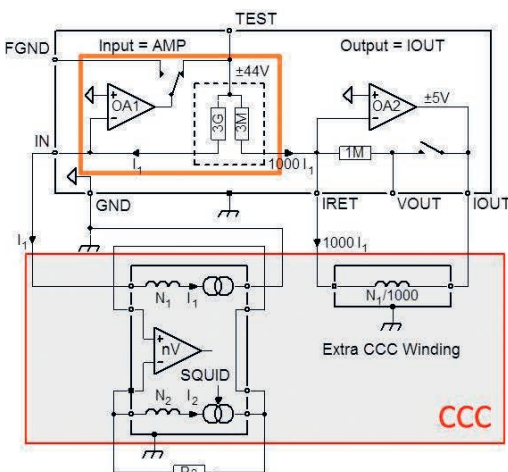


Bild 7: Elemente des CCC-Systems zur Kalibrierung des ULCA mit höchster Genauigkeit. Die zentralen Elektronikkomponenten, also die digitale Doppelstromquelle sowie das als Nulldetektor eingesetzte SQUID-System (SQUID = *superconducting quantum interference device*), sind PTB-Entwicklungen, ebenso wie der Komparator mit mehr als 18 000 binär aufgeteilten Windungen.

##### Kalibrierung der ULCA-Eingangsstufe:



##### Kalibrierung der ULCA-Ausgangsstufe:

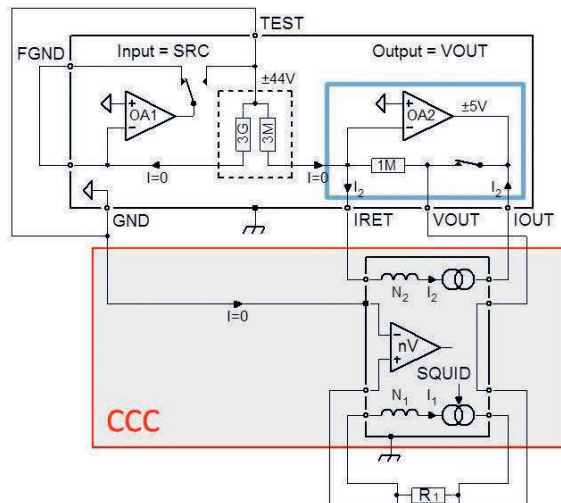


Bild 8: Verfahrensschema zur Kalibrierung von Eingangs- (links) und Ausgangsstufe (rechts) eines ULCA mittels Kryostromkomparator (CCC) in zwei separaten Schritten.

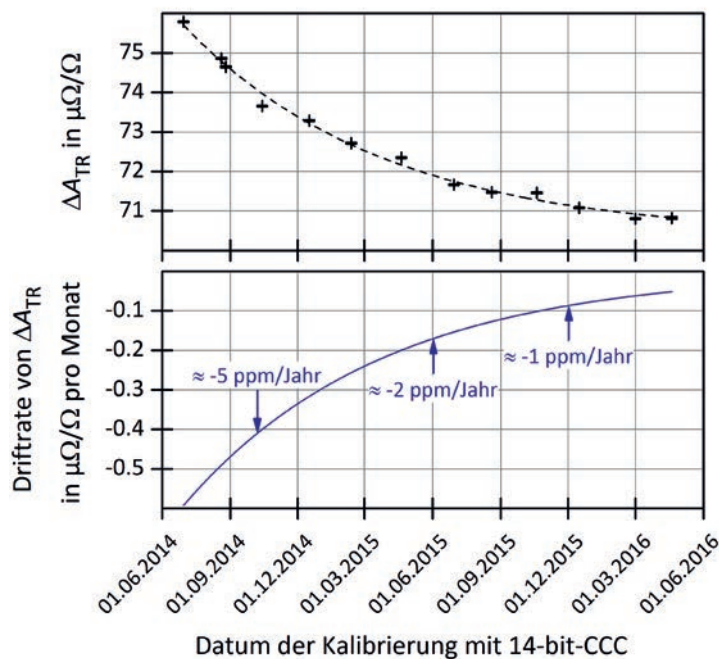


Bild 9: Historie der Kalibrierergebnisse für die totale effektive Transresistenz eines Standard-ULCA, oben dargestellt als Abweichungen vom Nominalwert ( $\Delta A_{TR} = A_{TR}/1 \text{ G}\Omega - 1$ ). Der Verlauf der Kalibrierwerte über etwa zwei Jahre zeigt das typische exponentielle Einlaufverhalten (gestrichelt eingezeichnet). Das untere Panel zeigt den daraus abgeleiteten zeitlichen Verlauf der Driftrate für  $\Delta A_{TR}$ .

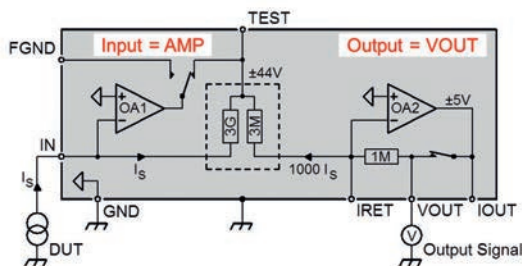
Die kombinierte Kalibrierunsicherheit für die effektive Transresistenz  $A_{TR} = G_I \cdot R_{IV}$  des ULCA beträgt dabei typischerweise  $0,02 \mu\Omega/\Omega$ . Weitere Details zur Kalibrierung mit dem 14-bit-CCC sind in der Literatur dargestellt [3, 4].

Die Historie der Kalibrierergebnisse für einen Standard-ULCA über einen Zeitraum von etwa zwei Jahren ist in Bild 9 dargestellt.

Das erkennbare exponentielle Einlaufverhalten der Transresistenz  $A_{TR}$  kann auf der Grundlage von Langzeituntersuchungen an bislang insgesamt 6 ULCA-Kanälen als typisch angesehen werden. Dieses Verhalten spiegelt möglicherweise „Erholungsprozesse“ in den Widerständen der Eingangs- und Ausgangsstufe nach thermischen Belastungen in deren Herstellungsprozess und der Platinenassemblierung wider. Wie das untere Panel in Bild 9 zeigt, betrug der Wert der zeitlich abklingenden Driftrate von  $A_{TR}$  etwa ein Jahr nach der Assemblierung des ULCA weniger als  $2 \mu\Omega/\Omega$  pro Jahr und war nach 18 Monaten auf etwa  $1 \mu\Omega/\Omega$  pro Jahr abgefallen. Gestützt auf die Beobachtungen an dem gesamten bislang verfügbaren Geräteensemble kann generalisierend und sehr konservativ davon ausgegangen werden, dass die Langzeitstabilität der Transresistenz  $A_{TR}$  eines Standard-ULCA ein Jahr nach Assemblierung betragsmäßig einer Driftrate von weniger als  $5 \mu\Omega/\Omega$  pro Jahr entspricht und nach zwei Jahren auf weniger als  $2 \mu\Omega/\Omega$  pro Jahr abfällt. Diesbezüglich ist der ULCA den besten bislang kommerziell verfügbaren Pikoamperemetern um rund eine Größenordnung überlegen [11].

Das typischerweise sehr kleine und zudem monoton abfallende Driftverhalten von  $A_{TR}$  zeichnet den ULCA in besonderer Weise aus, da es die Anforderungen an notwendige Nachkalibrierungen im praktischen Einsatz wesentlich entspannt. Die Länge von Kalibrierintervallen wird durch die Genauigkeit bestimmt, die durch die jeweilige Anwendung gefordert ist. Die hohe Stabilität der Transresistenz  $A_{TR}$  bezüglich Temperaturzyklen und mechanische Erschütterungen zeigte sich bereits im Einsatz des ULCA als Transfernromal, worauf in [15] und in Abschnitt 6.3 dieses Artikels noch näher eingegangen wird.

ULCA im Elektrometerbetrieb ( $I \leq 5 \text{ nA}$ ):



ULCA im Stromquellenbetrieb ( $I \leq 5 \text{ nA}$ ):

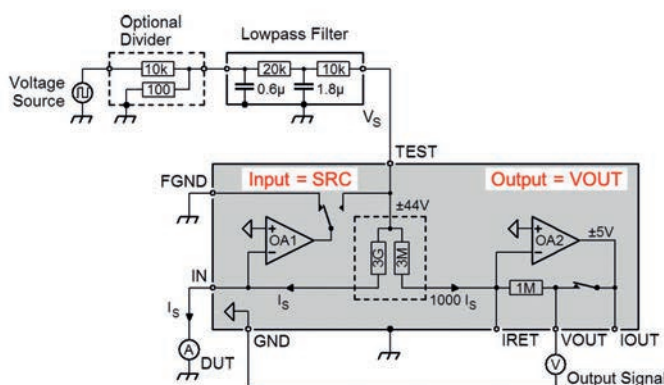


Bild 10: Standard-ULCA zur Strommessung (oben) und Stromerzeugung (unten) im Stromstärkebereich bis  $\pm 5 \text{ nA}$  unter Ausnutzung der Transresistenz  $A_{TR} = 1 \text{ G}\Omega$  (normal mode). Die roten Beschriftungen beziehen sich auf die jeweilige Konfiguration der Eingangs- und Ausgangsstufe, die über Schalter an der Batteriebox gewählt werden. Im Betrieb als Stromgenerator (unten) wird das IN-Potential (hier: Stromausgang) über OA1 virtuell auf GND gelegt, sodass eine eventuelle Bürdenspannung des DUT keinen Effekt auf den erzeugten Strom  $I_s$  hat. Weitere Erläuterungen siehe Text.

### 5. Einsatz- und Betriebsmodi des ULCA

Das ULCA-Konzept zeichnet sich in der Praxis besonders durch erhebliche Flexibilität bezüglich möglicher Einsatzzwecke und -bereiche aus. Wie bereits erwähnt, kann der Standard-ULCA sowohl als Kleinststrommeter als auch als Kleinststromquelle eingesetzt werden, und dies jeweils in zwei Stromstärkebereichen. Diese insgesamt vier unterschiedlichen Modi erfordern jeweils unterschiedliche Konfigurationen und Beschaltungen des ULCA, die in diesem Abschnitt erläutert werden. Weitere Details sind nachlesbar in [3], [16] und [17].

### 5.1. ULCA im normal mode für Stromstärken im Bereich ± 5 nA

Im Stromstärkebereich bis 5 nA wird der Standard-ULCA unter Ausnutzung seiner vollen Transresistenz  $A_{TR} = 1 \text{ G}\Omega$  betrieben, bezeichnet als *normal mode*. Der Betrieb im Elektrometermodus mit Strom-Spannungswandlung (originärer Einsatzzweck des ULCA, erfolgt in der in Bild 10 (oben) gezeigten Konfiguration. Der ULCA wandelt den aus einer Stromquelle (DUT = *device under test*) gespeisten Eingangsstrom  $I_S$  in die ULCA-Ausgangsspannung  $Output\ Signal = I_S \cdot A_{TR}$ . Die Ausgangsspannung wird mit einem hochauflösenden Voltmeter rückgeführt gemessen.

Der Betrieb des ULCA als Kleinstromquelle (in Bild 10 unten gezeigt) erfordert zusätzlich eine Spannungsquelle „Voltage Source“, die über einen Tiefpass und gegebenenfalls zusätzlich über einen Spannungsteiler an den „TEST“-Anschluss des ULCA angeschlossen wird. Die effektiv über der Transresistenz  $A_{TR}$  abfallende Spannung  $Output\ Signal$  wird mit einem Voltmeter differentiell zwischen den Anschlüssen VOUT und GND abgegriffen. Der ULCA generiert am Stromausgang (Anschluss IN) einen Strom der Stärke  $I_S = Output\ Signal / A_{TR}$ , der mit einem Elektrometer (DUT) gemessen werden kann.

### 5.2. ULCA im extended mode für Stromstärken zwischen 5 nA und 5 µA

Im Stromstärkebereich zwischen ±5 nA und ±5 µA wird nur die Transresistenz der Ausgangsstufe ( $R_{IV} = 1 \text{ M}\Omega$  beim Standard-ULCA) genutzt. Dieser Betriebsmodus wird als *extended mode* bezeichnet.

Der Betrieb im Elektrometermodus ohne Verwendung der stromverstärkenden Eingangsstufe ist in Bild 11 (oben) gezeigt. Der ULCA wandelt den aus einer Stromquelle (DUT) gespeisten Eingangsstrom  $I_S$  in die ULCA-Ausgangsspannung  $-I_S \cdot R_{IV}$ , die mit einem hochauflösenden Voltmeter rückgeführt gemessen wird.

Der Betrieb des ULCA als Kleinstromquelle im *extended mode* erfolgt gemäß dem in Bild 11 (unten) gezeigten Schema. Der ULCA generiert einen Strom der Stärke  $I_S$  entsprechend der effektiv über  $R_{IV}$  abfallenden Spannung, welche mit dem Voltmeter differentiell zwischen den Anschlüssen VOUT und GND abgegriffen wird.

## 6. Anwendungen des ULCA: erste Beispiele aus der Praxis

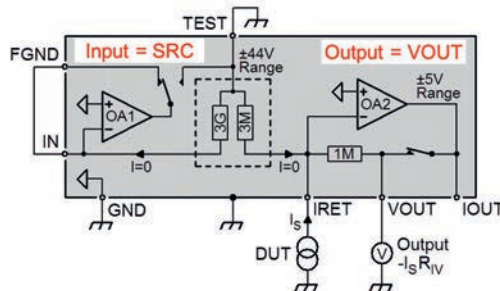
Die zahlreichen Einsatzmöglichkeiten und Vorzüge des ULCA werden exemplarisch anhand einiger Anwendungsbeispiele aus der Praxis vorgestellt. Auf entsprechende Originalpublikationen wird im Text verwiesen.

### 6.1. Messung von Einzelelektronen-Strömen

Jüngste Fortschritte auf dem Gebiet der Einzelelektronen-Schaltungen (*Single Electron Transport = SET*) erlauben die Erzeugung von Stromstärken in der Größenordnung von 100 pA mit Unsicherheiten entsprechend  $1 \mu\text{A/A}$  und besser [5, 6]. Damit sind sogenannte SET-Pumpen Kandidaten für die Realisierung eines zukünftigen Quanten-Stromnormals [1, 5, 8].

In der PTB ist mittels Einsatz des ULCA als Pikoamperemeter kürzlich ein messtechnischer Durchbruch in der SET-Forschung gelungen – die Quantisierung des von einer SET-Pumpe gelieferten Stromes wurde mit bislang unerreichter Exaktheit nachgewiesen: Innerhalb der relativen Messunsicherheit von nur  $0,2 \mu\text{A/A}$  stimmte die Stromstärke von etwa 87 pA mit dem erwarteten quantisierten Wert  $e \cdot f$  überein [18]. Dies bedeutet eine Verbesserung der Unsicherheit um etwa einen Faktor fünf gegenüber zuvor erzielten Ergebnissen weltweit. Außerdem übertraf die erreichte Genauigkeit des erzeugten „Quanten-Stromes“ erstmals nachweislich die der „klassischen“ Ampere-Realisierung im SI-Einheitensystem [1].

ULCA im Elektrometerbetrieb ( $5 \text{ nA} \leq I \leq 1 \mu\text{A}$ ):



ULCA im Stromquellenbetrieb ( $5 \text{ nA} \leq I \leq 1 \mu\text{A}$ ):

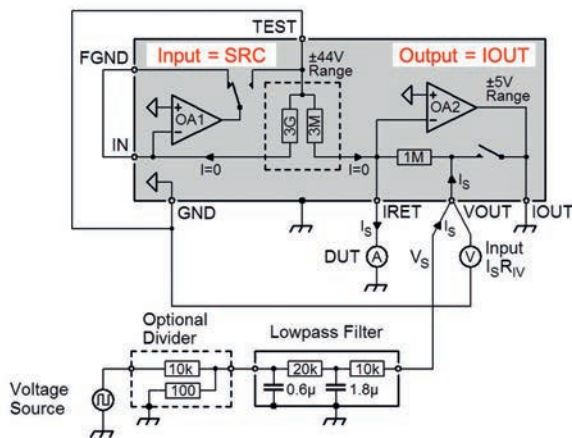


Bild 11: Standard-ULCA zur Strommessung (oben) und Stromerzeugung (unten) im Stromstärkebereich ±5 nA bis ±5 µA unter Ausnutzung der Transresistenz der Ausgangsstufe  $R_{IV} = 1 \text{ M}\Omega$  (*extended mode*), also ohne Verwendung der stromverstärkenden Eingangsstufe. Die roten Beschriftungen beziehen sich auf die jeweilige Konfiguration der Eingangs- und Ausgangsstufe, die über Schalter an der Batteriebox gewählt werden. Weitere Erläuterungen siehe Text.

## 6.2. Kalibrator für Kleinstrommessgeräte und -quellen

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sind Kalibrierungen von Kleinstrominstrumenten neben dem forschungsnahen Einsatz auch von wachsender Bedeutung für zahlreiche industrie- und anwendungsnahe Felder. Von besonderer Bedeutung sind dabei stabile und praktikable rückführbare Methoden, die insbesondere ohne den Einsatz von Kryotechnik auskommen. Neben den einleitend bereits genannten Beispielen gilt dies auch für biotechnologische Anwendungen, so unter anderem für Pikoampere-Messtechnik, welche in DNA-Sequenzern oder für die Untersuchung von Ionenleitungsprozessen in organischen Substanzen verwendet wird [19]. In der Umweltmesstechnik beruht beispielsweise die Gassensorik auf fA-Stromstärkesmesstechnik, ebenso wie die Konzentrationsmessung von Aerosol-Nanopartikeln. Zur Kalibrierung von Kondensationspartikelzählern haben einige führende Nationale Metrologieinstitute (NMIs) bereits nationale Normale eingeführt, die auf sogenannten *Faraday-Cup-Aerosol-Elektrometern* beruhen [20]. Schlüsselkomponente hierbei sind fA-Elektrometer, deren Kalibrierunsicherheit bislang typischerweise auf einige Teile in 1000 begrenzt ist. Quantitative Verbesserungen der Elektrometrie haben somit auch direkte Auswirkungen auf Bereiche der Umweltmesstechnik, die zugunsten des Umweltschutzes mit ständig steigenden Anforderungen, entsprechenden gesetzlichen Regulierungen und internationalen Harmonisierungen verbunden sind.

Ein Beispiel für einen typischen Messaufbau, bei dem der ULCA als Stromgenerator für die Kali-

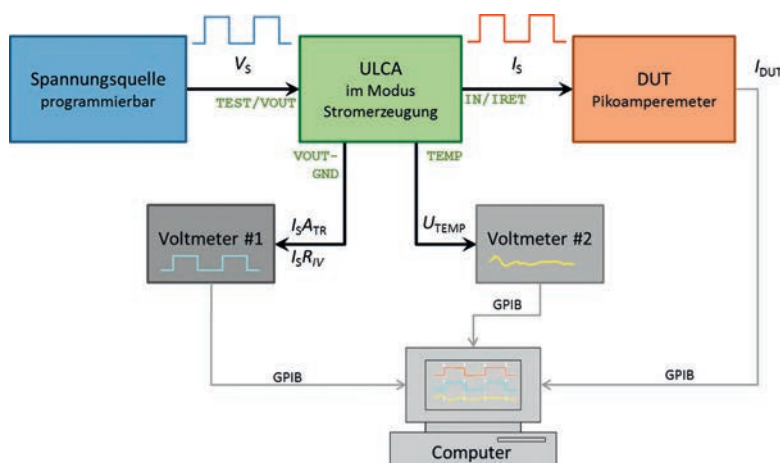


Bild 12: Schematischer Aufbau zur Kalibrierung von Elektrometern. Der ULCA wird als Kalibrator im Stromquellenbetrieb eingesetzt. Voltmeter #1 misst die über der ULCA-Transresistenz abfallende Spannung  $I_S \cdot A_{TR}$  (bzw.  $I_S \cdot R_{IV}$  im *extended mode*). Voltmeter #2 liest die Spannung am internen ULCA-Temperatursensor aus, was die Korrektur von Temperatureffekten bei Kalibrierungen mit höchsten Genauigkeitsanforderungen erlaubt. Die Versuchssteuerung und Datenaufnahme erfolgt computergestützt. Die Auswertung der Kalibrierung erfolgt durch Vergleich der Kalibrierstromstärke  $I_S$  mit der vom DUT angezeigten Stromstärke  $I_{DU}$

brierung eines Elektrometers (Pikoamperemeters) eingesetzt wird, ist in Bild 12 gezeigt.

Wie in [17] gezeigt wird, ermöglicht der Einsatz des ULCA als Kalibratorstromquelle oder -meter eine Steigerung der Kalibriergenauigkeiten im Bereich von Kleinstrominstrumenten, welche bislang verwendete Verfahren um bis zu etwa zwei Größenordnungen übertrifft [12]. Gepaart mit seiner hohen Flexibilität, Praktikabilität und Stabilität macht dies den ULCA besonders interessant für Kalibrierdienstleister und industrielle Kalibrierlaboratorien.

Neben der rückführbaren Messung und Erzeugung kleiner Ströme erlaubt der ULCA auch die Kalibrierung hochohmiger Widerstände im M $\Omega$ - und G $\Omega$ -Bereich auf höchstem Genauigkeitsniveau, so wie im folgenden Abschnitt 6.3 kurz diskutiert. Nähere Details sind in [3] und [15] beschrieben.

## 6.3. Transfornormal für kleine Stromstärken und hohe Widerstände

Im Rahmen des kürzlich abgeschlossenen europäischen Metrologieforschungsprojektes „*Quantum Ampere*“ [2] wurde der Prototyp eines zweikanaligen Standard-ULCA für unterschiedliche Vergleichsmessungen an zwei Instituten außerhalb der PTB erfolgreich als Transfornormal für kleine Stromstärken eingesetzt, wobei beide Kanäle jeweils vorher und nachher in der PTB mittels 14-bit-CCC kalibriert wurden. Die Ergebnisse dieser Vergleiche sind hier kurz zusammengefasst und im Detail veröffentlicht in [15].

Nach vorbereitenden Kalibrierungen an der PTB wurde der ULCA per Luftfracht zum *National Physical Laboratory* (NPL, das NMI des Vereinigten Königreichs) gesandt. Dort wurde er zur Messung unterschiedlicher Hochohm-Widerstände eingesetzt, welche zuvor mit dem CCC-System des NPL kalibriert worden waren. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in Bild 13 (links) dargestellt, wobei die roten und blauen Symbole mit kleinen Unsicherheitsbalken die ULCA-Kalibrierungen in der PTB darstellen. Man erkennt eine gute Übereinstimmung im Rahmen der durch die Hochohm-Kalibriereinrichtung des NPL bedingten Standardunsicherheiten (braune Symbole). Einige Wochen später wurde derselbe ULCA auf dem Landweg zum französischen Metrologieinstitut *Laboratoire national de métrologie et d'essais* (LNE) gesandt. Hier wurde er zur Erzeugung von Referenzströmen eingesetzt, die mit dem CCC-basierten Stromverstärker des LNE gemessen wurden. Auch die Ergebnisse dieses Vergleichs, in Bild 13 (rechts) dargestellt, stimmten im Rahmen der Messunsicherheit des CCC-Stromverstärkers (graue Symbole) sehr gut überein.



Die erzielten Ergebnisse, beruhend auf Stromstärkemessungen im Bereich zwischen 0,16 nA und 13 nA [15], waren bezüglich der Messunsicherheiten von etwa 1  $\mu\text{A}/\text{A}$  rund eine Größenordnung besser als alle jemals zuvor durchgeführten internationalen Vergleiche im Bereich kleiner Stromstärken [11]. Dies ist eine Folge der überlegenen Stabilitätseigenschaften des ULCA, die ihn insbesondere als Transfornormal ausgezeichnet geeignet machen. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass der ULCA während des Lufttransports zwischen PTB und NPL deutlichen Temperaturänderungen zwischen 23 °C und 8 °C ausgesetzt war, welche jedoch nur kleine Änderungen der totalen Transresistenzen beider Kanäle von jeweils weniger als  $\pm 0,5 \mu\Omega/\Omega$  bewirkten (vergleiche in Bild 13 die PTB-Kalibrierungen in den Wochen 1 und 3 vor und nach den NPL-Messungen). Wie Bild 13 ebenfalls zeigt, war unter schonenderen Transportbedingungen wie im Falle des Transports zwischen PTB und LNE (bei Normaltemperatur zwischen den Wochen 8 und 12) keinerlei Beeinträchtigung der zeitlichen Stabilität außerhalb der in Abschnitt 3 genannten Spezifikationen erkennbar.

Die ausgezeichnete Stabilität des ULCA als Transfornormal wurde zwischenzeitlich in weiteren Luftfrachttransporten zwischen der PTB und dem finnischen Metrologieinstitut VTT/MIKES bestätigt – die beobachteten Änderungen der Transresistenz betragen hier weniger als 0,1  $\mu\Omega/\Omega$ .

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Der in diesem Artikel vorgestellte *Ultrastable Low-noise Current Amplifier* (ULCA) ist ein extrem leistungsfähiges Instrument für die hochgenaue rückgeführte Messung und Erzeugung von kleinen elektrischen Stromstärken. Seine herausragenden Eigenschaften machen ihn überlegen gegenüber bisher in der Kleinstrommetrologie verwendeten Referenzmethoden und -instrumenten [9, 11]. Der ULCA als Transresistenzverstärker (Strom-Spannungswandler) zeichnet sich besonders durch höchste Konstanz und Stabilität des Transferkoeffizienten aus, der zudem mittels eines Kryostromkomparators extrem genau auf das Quanten-Widerstandsnormal zurückgeführt werden kann [3, 4]. In Verbindung mit einem auf das Quanten-Spannungsnormal rückgeführten Voltmeter ermöglicht er daher „quantengenaue“ Metrologie im Bereich kleiner Ströme. In zahlreichen Anwendungsfeldern, besonders im Bereich der Kalibrierung von Elektrometern, Pikoamperemetern und Kleinstromquellen, werden durch den ULCA signifikante und substanzielle Verbesserungen möglich, die sich in einer Genauigkeitssteigerung von bis zu etwa zwei Größenordnungen auswirken [11, 12]. Beispielsweise ermöglicht der ULCA im

Elektrometerbetrieb die Messung einer Stromstärke von 100 pA mit einer relativen Gesamtunsicherheit von 0,1  $\mu\text{A}/\text{A}$  innerhalb akzeptabler Mittelungszeiten von weniger als einem Tag. Neben seiner herausragenden Präzision und Genauigkeit bietet der ULCA zudem die Vorteile hoher Flexibilität, leichter Bedienbarkeit und Stabilität im praktischen Einsatz.

Auch für zahlreiche neue und zukünftige Anwendungen bietet der ULCA großes Potenzial, so zum Beispiel durch die Möglichkeit der Erzeugung zeitlich modulierter Stromstärken. Auf dem hochaktuellen Feld der Einzelelektronenphysik beziehungsweise der Entwicklung von Einzelelektronenpumpen stellt der ULCA bereits jetzt das herausragende *state-of-the-art*-Messinstrument dar [18]. In Kombination mit einer selbstreferenzierter Einzelelektronenpumpe [7, 8] bietet der ULCA die vielversprechende Möglichkeit zur Realisierung des „Quantenmetrologischen Dreiecks“ [21] mit verbesserter Genauigkeit [4]. Dieses Experiment stellt einen fundamentalen Universalitätstest der elektrischen Quantennormale dar – eine Verringerung der experimentellen Unsicherheit auf einen Teil in zehn Millionen oder besser würde einen wertvollen Beitrag zur Absicherung der Grundlagen der elektrischen Quantenmetrologie liefern.

Im Sinne der Wirtschaftsförderung durch die PTB wurde die Kommerzialisierung des ULCA bereits im Jahr 2015 eingeleitet. Nach erfolgreichem Technologietransfer wird das Instrument mittlerweile durch ein deutsches mittelständisches Unternehmen unter PTB-Lizenz hergestellt und vertrieben [14]. Neben der in diesem Beitrag

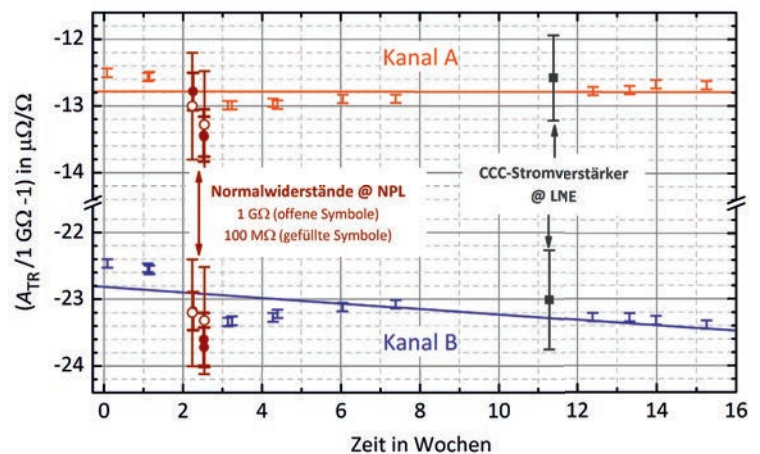


Bild 13: Ergebnisse von Kalibrierungen der totalen Transresistenz  $A_{TR}$  zweier Kanäle (A und B) eines ULCA, durchgeführt an drei verschiedenen Standorten (PTB, NPL und LNE). Dargestellt ist die relative Abweichung vom Nennwert 1 GΩ über der Zeit. Die Fehlerbalken zeigen Gesamtstandardunsicherheiten. Unmittelbar vor und nach jedem Transport wurde der ULCA mit dem 14-bit-CCC in der PTB kalibriert (rote und blaue Symbole mit kleinen Unsicherheiten). Messungen von 100-MΩ- und 1-GΩ-Normalwiderständen des/am NPL wurden zwischen den Wochen 2 und 3 durchgeführt. Messungen mit dem CCC-basierten Stromverstärker des/am LNE erfolgten zwischen den Wochen 11 und 12. Durchgezogene Linien entsprechen linearen Anpassungen an die PTB-Kalibrierungen.

vorgestellten Standardversion des ULCA mit  $1 \text{ G}\Omega$  Transresistanz und  $2,4 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$  Eingangstromrauschen werden für zukünftige spezielle Einsatzzwecke weitere ULCA-Varianten entwickelt [16, 22], so zum Beispiel ein Instrument mit einem weiter reduzierten Eingangstromrauschen von nur  $1,2 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der ULCA ein Meilenstein im Bereich der Kleinstrommetrologie ist, der neue Maßstäbe in zahlreichen Mess- und Kalibrieranwendungen setzt. Als extrem stabiles Transfernormal eingesetzt, ermöglicht er zudem Vergleiche der Kalibrier- und Messmöglichkeiten zwischen Laboratorien mit höchster Genauigkeit.

### Danksagung

Die Autoren danken F. J. Ahlers, U. Becker, R. Behr, M. Götz, C. Krause, G. Muchow, E. Pesel und U. Siegner aus der Abteilung Elektrizität der PTB Braunschweig sowie M. Klemm, M. Luther und M. Piepenhagen aus dem Fachbereich 7.2 „Kryophysik und Spektrometrie“ der PTB Berlin für wertvolle Unterstützung und Zusammenarbeit. Teile der hier vorgestellten Arbeit wurden finanziell unterstützt durch Förderung im Rahmen des Europäischen *Joint Research Project „Quantum ampere: Realisation of the new SI ampere“* (JRP SIB07).

### Literatur

- [1] H. Scherer und U. Siegner, *Elektronen zählen, um Strom zu messen*, PTB-Mitteilungen **126**, Heft 2, 23–31 (2016).
- [2] European Joint Research Project *Quantum ampere: Realisation of the new SI ampere* (JRP SIB07), <http://goo.gl/SmfEji> (Letzter Zugriff am 17.10.2016).
- [3] D. Drung, C. Krause, U. Becker, H. Scherer und F. J. Ahlers, *Ultrastable low-noise current amplifier: a novel device for measuring small electric currents with high accuracy*, Rev. Sci. Instrum. **86**, Heft 2, 024703 (2015).
- [4] D. Drung, M. Götz, E. Pesel und H. Scherer, *Improving the traceable measurement and generation of small direct currents*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **64**, Heft 11, 3021–3030 (2015).
- [5] J. P. Pekola, O.-P. Saira, V. F. Maisi, A. Kemppinen, M. Möttönen, Y. Pashkin und D. V. Averin, *Single-electron current sources: toward a refined definition of the ampere*, Rev. Mod. Phys. **85**, Heft 4, 1421 (2013).
- [6] B. Kästner und V. Kashcheyevs, *Non-adiabatic quantized charge pumping with tunable-barrier quantum dots: a review of current progress*, Rep. Prog. Phys. **78**, Heft 10, 103901 (2015).
- [7] L. Fricke, M. Wulf, B. Kaestner, F. Hohls, P. Mirovsky, B. Mackrodt, R. Dolata, T. Weimann, K. Pierz, U. Siegner und H.-W. Schumacher, *Self-referenced single-electron quantized current source*, Phys. Rev. Lett. **112**, Heft 22, 226803 (2014).
- [8] L. Fricke, R. Dolata, B. Kästner, F. Hohls und H.-W. Schumacher, *Die Kunst des Elektronenzählens*, Physik in unserer Zeit **46**, Heft 2, 70–76 (2015).
- [9] G.-D. Willenberg, H. N. Tauscher und P. Warnecke, *A traceable precision current source for currents between 100 nA and 10 pA*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **52**, Heft 2, 436–439 (2003).
- [10] G.-D. Willenberg und H. N. Tauscher, *Novel digital voltage ramp generator for picoammeter calibrations*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **58**, Heft 4, 756–760 (2009).
- [11] G.-D. Willenberg, *EUROMET.EM-S24: Supplementary comparison of small current sources*, Metrologia **50**, Heft 1A, 01002 (2013).
- [12] BIPM (2014), *Calibration and Measurement Capabilities Electricity and Magnetism*, [http://kcdb.bipm.org/AppendixC/country\\_list.asp?Sservice=EM/DC.3.2](http://kcdb.bipm.org/AppendixC/country_list.asp?Sservice=EM/DC.3.2) (Letzter Zugriff am 17.10.2016).
- [13] S. P. Giblin, G.-D. Willenberg und N. E. Fletcher, *Frequency dependence of gas-dielectric capacitors used in sub-nA reference current generators*, CPEM 2010 Conference Digest, 318–319 (2010).
- [14] Magnicon GmbH, Barkhausenweg 11, 22339 Hamburg, Germany, <http://www.magnicon.com/metrology/> (Letzter Zugriff am 17.10.2016).
- [15] D. Drung, C. Krause, S. P. Giblin, S. Djordjevic, F. Piquemal, O. Séron, F. Rengnez, M. Götz, E. Pesel und H. Scherer, *Validation of the ultrastable low-noise current amplifier as travelling standard for small direct currents*, Metrologia **52**, Heft 6, 756–763, (2015).
- [16] D. Drung und C. Krause, *Ultrastable low-noise current amplifiers with extended range and improved accuracy*, IEEE Trans. Instrum. Meas., online (2016), doi: 10.1109/TIM.2016.2611298.
- [17] H. Scherer, D. Drung und C. Krause, *Improved calibration of instruments for small direct currents*, CPEM 2016 Conference Digest (2016).
- [18] F. Stein, D. Drung, L. Fricke, H. Scherer, F. Hohls, C. Leicht, M. Götz, Ch. Krause, R. Behr, E. Pesel, K. Pierz, U. Siegner, F. J. Ahlers und H. W. Schumacher, *Validation of a quantized-current source with 0.2 ppm uncertainty*, Appl. Phys. Lett. **107**, Heft 10, 103501 (2015).
- [19] N.-H. Kaneko, S. Nakamura und Y. Okazaki, *A review of the quantum current standard*, Meas. Sci. Technol. **27**, Heft 3, 032001 (2016).
- [20] H. Sakurai und K. Ehara, *Evaluation of uncertainties in femtoampere current measurement for the number concentration standard of aerosol nanoparticles*, Meas. Sci. Technol. **22**, Heft 2, 024009 (2011).

- [21] H. Scherer und B. Camarota, *Quantum metrology triangle experiments: a status review*, Meas. Sci. Technol. **23**, Heft 12, 124010 (2012).
- [22] C. Krause, H. Scherer und D. Drung, *Cable noise investigations for high-accuracy measurements of small direct currents*, CPEM 2016 Conference Digest (2016).