

IoT-Spezialisten

Sourcemeeter – genaues Messen zur Analyse von Geräten

Teil 1

Sourcemeeter sind vielseitige Werkzeuge im Bereich der Elektrotechnik. Sie kombinieren eine Strom- und Spannungsquelle mit den zugehörigen Messgeräten Volt- und Amperemeter und ermöglichen so eine vollständige Gleichstromcharakterisierung von Halbleiterbauteilen und Geräten [1]. Dieser Artikel beleuchtet zunächst einige Grundlagen und die Einsatzgebiete von Sourcemeetern. Anschließend folgt die Beschreibung einiger Spezifikationen, anhand derer drei Sourcemeeter miteinander verglichen werden.



Grundlagen

Sourcemeeter, auch Source-Measure-Unit (SMU) genannt, sind Messinstrumente zur präzisen Gleichstrom-Charakterisierung von Halbleiterbauteilen und Geräten. Sie sind eine Kombination aus einem hochwertigen Labornetzgerät, das sowohl strom- als auch spannungsgesteuert arbeitet, und einem digitalen Multimeter. Durch die Bündelung der Versorgungs- und Messfunktionalitäten ergeben sich mehrere Vorteile gegenüber einem klassischen Aufbau bestehend aus Netzteil, Volt- und Ampere- bzw. Multimeter [2]:

- Keine manuelle Synchronisierung zwischen den Komponenten erforderlich → Reduzierung des Zeitaufwands, Vermeidung von Fehlern
- Reduzierter Platzbedarf
- Kostenersparnis

Der erste Vorgänger des Sourcemeters wurde im Jahr 1982 von Hewlett-Packard mit dem „Halbleiter-Parameter-Analysator“ HP4145A vorgestellt (Bild 1). Das Gerät bestand im Wesentlichen aus einer Kombination von vier Source-Monitor-Einheiten und einer zentralen Recheneinheit [5]. Mit dem Keithley 236 folgte 1989 die erste eigenständige SMU. Sie konnte bereits eine Spannung von 0 bis 110 V und einen Strom von 0 bis 100 mA bereitstellen [6]. Bedingt durch den anhaltenden technischen Fortschritt wurden die Geräte im Laufe der Zeit immer kompakter und preiswerter, sodass SMUs heute in hohen Stückzahlen den automatisierten Testprozess von Bauteilen unterstützen können.

Einsatzgebiete und Anwendungsfälle

Zu den Einsatzgebieten von Sourcemetern zählen u. a. die Bauteilcharakterisierung, Halbleiterfertigung, Geräte- und Schaltkreisprüfung sowie auch die Materialprüfung [7].

Die Anwendungsfälle lassen sich dabei allgemein in drei Bereiche gliedern: Charakterisierung, Validierung und Optimierung. Im Bereich der Charakterisierung geht es z. B. darum zu prüfen, welcher Strom bei einer angelegten Spannung durch ein Bauteil fließt (UI-Kennlinie). Auf diese Weise kann beispielsweise die Diffusionsspannung einer Diode bestimmt werden [2]. Der Bereich Validierung



Bild 1: Vorgänger des Sourcemeters: HP4145A (oben)[3] und die erste Stand-alone-SMU Keithley 236 (unten)[4]

bezieht sich auf reproduzierbare Funktionstests und Testsysteme in der Halbleiter- und Gerätefertigung sowie auf Messungen während des Entwicklungsprozesses. Ziel dabei ist es, die tatsächlichen Ströme und Spannungen mit den gewünschten Anforderungen zu vergleichen und bei Unstimmigkeiten Maßnahmen zu ergreifen. Sourcemeeter können ebenfalls die Optimierung der Energieaufnahme von Bauteilen und Geräten unterstützen. In der Praxis kann so die Stromaufnahme eines Prototyps über die Zeit gemessen werden, und anhand des bekannten Firmwareablaufs ist eine Zuordnung der Teilströme möglich. Falls sich nun herausstellt, dass z. B. die Messung mit einem Beschleunigungssensor mehr Energie als gewünscht konsumiert, können Anpassungen in der Hard- oder Firmware vorgenommen werden [8].

Schaltungsaufbau und Funktionsprinzip

Wie in Bild 2 zu sehen ist, besteht ein Sourcemeeter im Wesentlichen aus einem hochwertigen Netzteil (blau) sowie einem digitalen Multimeter (orange) [9].

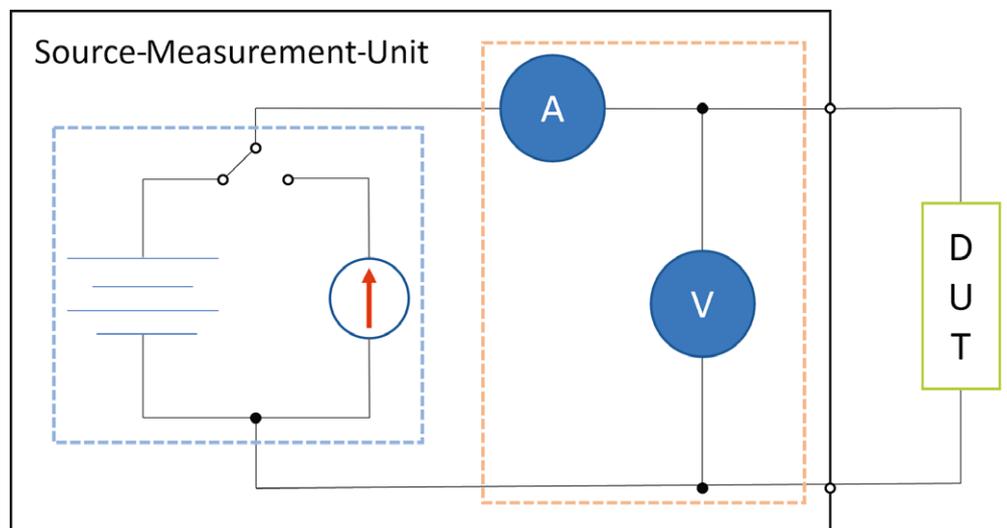


Bild 2: Schematischer Aufbau einer Source-Measure-Unit nach [9]

Die Funktionsweise wird im Folgenden aus zwei Perspektiven betrachtet: aus der der angeschlossenen Geräte bzw. Bauteile und der der zu vermessenden Größen Strom und Spannung.

Komponenten, die an ein Sourcemeter angeschlossen werden, können in aktive und passive Bauteile bzw. Geräte eingeteilt werden. Als aktiv werden in diesem Zusammenhang Bauteile und Geräte bezeichnet, die selbst Energie produzieren, wie Generatoren, Solarzellen oder Batterien. Das Sourcemeter verhält sich in diesem Fall wie eine Last, bei der entweder der Strom oder die Spannung einen negativen Wert aufweist (Quadranten II und IV). Passive Bauteile und Geräte wie Dioden, Widerstände, Kondensatoren oder Microcontroller produzieren selbst keine Energie, sondern konsumieren diese durch die SMU (Source). Die SMU verhält sich nun als Quelle, bei der Strom und Spannung dieselben Vorzeichen aufweisen (Quadranten I und III). **Bild 3** verdeutlicht die genannten Zusammenhänge [2].

Zur Messung der elektrischen Größen Spannung und Strom sind die meisten SMUs in der Lage, eine konstante Spannung oder einen konstanten Strom bereitzustellen. Zur Messung des Stroms stellt die SMU eine konstante Spannung und einen variablen Strom bereit.

Ein zuvor gesetztes Stromlimit verhindert, dass das angeschlossene Gerät einen zu hohen Strom bezieht. Für die Spannungsmessung wird das Gerät mit einem konstanten Strom versorgt. Da die Spannung variieren kann, ist es notwendig, ein Spannungslimit einzustellen, um analog zum Stromlimit Beschädigungen am Gerät zu vermeiden [10].

Sourcemeter können auch als reine Volt- bzw. Amperemeter betrieben werden. Dies geschieht durch die folgenden Einstellungen [10]:

SMU als Voltmeter:

- Einstellung des Gleichstrommodus
- Auswahl des geringsten Strommessbereichs
- Versorgung des Geräts mit 0 A

SMU als Amperemeter:

- Einstellung des Gleichspannungsmodus
- Auswahl des geringsten Spannungsmessbereichs
- Versorgung des Geräts mit 0 V

Technisch gesehen verhält sich die SMU im Betrieb als Voltmeter wie eine hochohmige Last. Der Amperemeter-Modus ist gleichbedeutend mit einem Kurzschluss [10].

Für die Auswahl eines geeigneten Sourcemeters ist es entscheidend, die Anforderungen des Anwendungsfalls wie den Bereich der zu erwartenden Spannungen und Ströme (Messbereich) und die erforderliche Messgenauigkeit zu kennen.

Insbesondere in der Produktion und Entwicklung werden teils sehr hohe Qualitätsansprüche an die Messinstrumente gestellt, was sich jedoch auch im Preis der Geräte von mehreren Tausend Euro widerspiegelt.

Aus diesem Grund geht es in den folgenden Unterabschnitten um die wichtigsten Spezifikationen von SMUs.

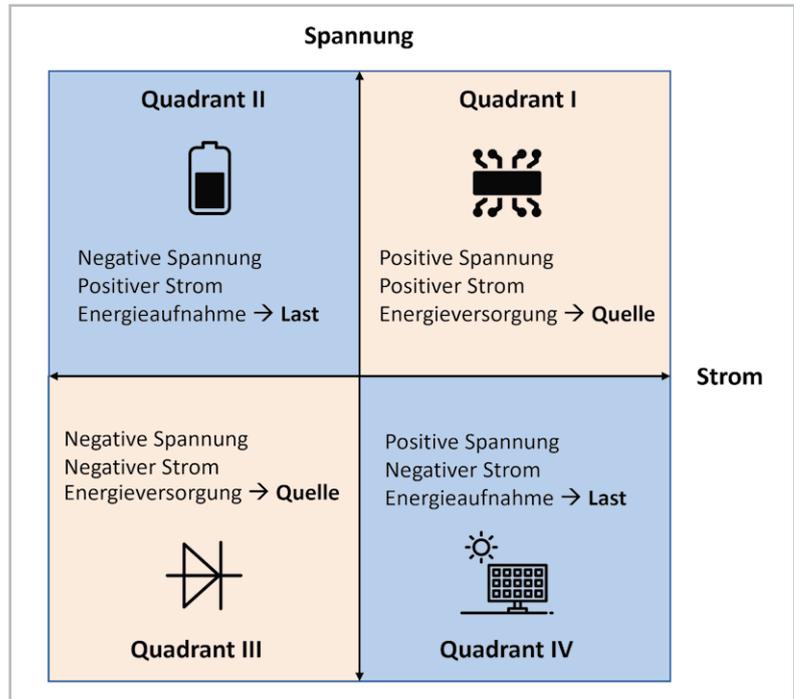


Bild 3: Operationsbereich von Sourcemetern im 4-Quadranten-Modell nach [2]

Quell- und Messbereich

Die Angabe über den Strom- und Spannungsbereich ist im Datenblatt einer SMU zu finden und kann entweder in Textform oder durch einen Graphen wie in **Bild 3** dargestellt werden. Der jeweilige Gesamtbereich gliedert sich dabei meist in mehrere Teilbereiche, die sich in ihrer Auflösung unterscheiden (Näheres im Abschnitt Genauigkeit).

Falls mit der SMU auch energieproduzierende Bauteile wie Generatoren, Solarzellen oder Batterien vermessen werden, ist darauf zu achten, dass die SMU auch in den Quadranten II und IV funktioniert (elektronische Last/Sink) [2].

Genauigkeit

Die Genauigkeit eines Messinstruments bezieht sich auf die Abweichung des Messwertes zum physikalisch korrekten Wert [11]. Im Datenblatt eines Sourcemeters wird dieser Wert meist in der Form $\pm(X\% + Y)$ angegeben. Die Variable X beschreibt dabei einen von der Höhe des gemessenen Stroms abhängigen relativen Verstärkungsfehler (gain error). Zu diesem wird ein konstanter Fehler Y addiert (offset error). Zur Verdeutlichung werden zwei fiktive SMUs betrachtet, die sich durch die folgenden Genauigkeitsangaben auszeichnen:

- SMU 1: $\pm(0,2\% + 100 \text{ nA})$
- SMU 2: $\pm(1\% + 1 \mu\text{A})$

Soll nun mit beiden Geräten ein Sleep Strom von $1 \mu\text{A}$ gemessen werden, könnte das Ergebnis der ersten SMU im Bereich $1 \mu\text{A} \pm 102 \text{ nA}$ liegen. Prozentual liegt der Fehler damit bei 10,2 %. Bei der zweiten SMU ist der Bereich mit $1 \mu\text{A} \pm 1,01 \mu\text{A}$ bereits deutlich größer.

Faktisch könnte der gemessene Strom damit gerundet Werte zwischen 0 und $2 \mu\text{A}$ annehmen und so um bis zu 100 % vom tatsächlichen Wert abweichen. Wird hingegen ein größerer Strom von z. B. 2 mA gemessen, liegt das Ergebnis der ersten SMU im Bereich $2 \text{ mA} \pm 4,1 \mu\text{A}$. Für die zweite MCU ergibt sich ein Bereich von $2 \text{ mA} \pm 21 \mu\text{A}$. Daraus ergeben sich mögliche prozentuale Abweichungen von 0,21 % (SMU 1) und 1,05 % (SMU 2).

Zusammenfassend wirkt sich die Genauigkeit eines Sourcemeters also relativ gesehen auf kleine Ströme deutlich stärker aus. Die Auswahl der SMU sollte sich daher nach den zu erwartenden Strömen und Spannungen des jeweiligen Anwendungsfalls und ggf. der vertretbaren Fehlertoleranz richten.

Bild 4: Source- und Messzeiten einer SMU

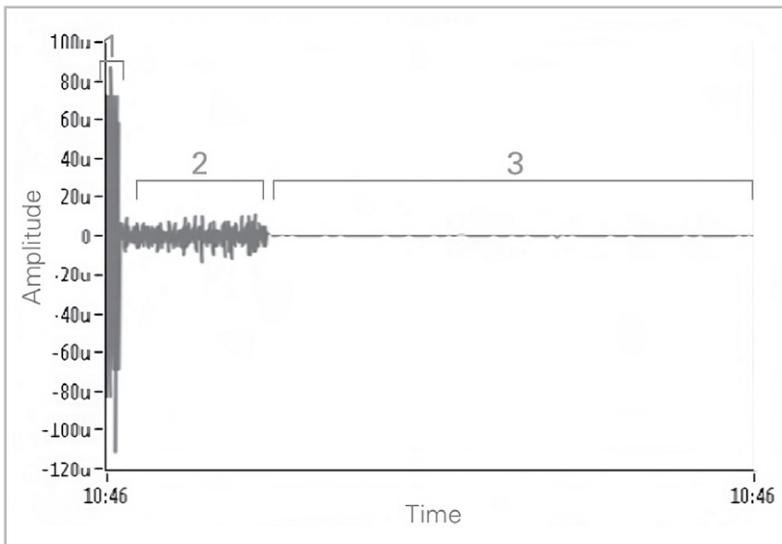


Bild 5: Auswirkung der Blendzeit auf das Messrauschen aus [10]

Auflösung

Allgemein beschreibt die Auflösung die Schrittweite, mit der der Strom oder die Spannung eingestellt bzw. gemessen werden kann. Beträgt z. B. der Strommessbereich 0-1A mit einer Auflösung von 0,01A, sind 100 Werte einstell- bzw. messbar [11]. Im Gegensatz zur Genauigkeit geht es bei der Auflösung nicht um die Abweichung vom absoluten korrekten Wert, sondern um die Unterscheidbarkeit der Messwerte. Liegen zwei Werte also näher als 10 mA beieinander, können sie nicht eindeutig unterschieden werden. Konkret kann sich eine SMU durch eine sehr hohe Genauigkeit auszeichnen, die tatsächlichen Messergebnisse würden jedoch bei einer geringen Auflösung des Wertebereichs künstlich verfälscht.

Messgeschwindigkeit und Rauschen

Die Messgeschwindigkeit eines Sourcemeters wird maßgeblich durch die Blendzeit vorgegeben [10]. Diese bezeichnet die Zeit, in der der Analog-digital-Converter (ADC) die Strom- und Spannungswerte ausliest. Bild 4 zeigt die abwechselnden Versorgungs- und Messphasen (Source und Measure) einer SMU.

Allgemein kann durch die Vergrößerung der Messdauer die Anzahl der Einzelmessungen für eine Mittelwertbildung erhöht werden, um so das Rauschen zu reduzieren. Gleichzeitig wird so jedoch die Messgeschwindigkeit beeinträchtigt.

Bild 5 veranschaulicht die Zusammenhänge zwischen Messdauer, Messgeschwindigkeit und Rauschen. Dazu wurden in [10] drei Messungen mit unterschiedlicher Messdauer durchgeführt. In Abschnitt 1 sind die Abweichungen der Messwerte mit einem Messfenster von 100 µs deutlich sichtbar. Die Erhöhung der Messdauer auf 1 ms in Abschnitt 2 verringert die Abweichungen bereits erheblich. In Abschnitt 3 weichen die Messwerte aufgrund einer Dauer von 16,7 ms kaum noch voneinander ab.

Produktvorstellung

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten bereits die Grundlagen, das Funktionsprinzip sowie einige Spezifikationen betrachtet wurden, werden nun drei Sourcemeter vorgestellt. Der Vergleich geht auf die wesentlichen Features und Unterschiede der Geräte ein und ergänzt diese durch Erfahrungen aus der Praxis. Ein abschließendes Fazit zeigt auf, welche SMU die optimale Wahl für den privaten Einsatz ist.

ST X-NUCLEO-LPM01A

Bild 6 zeigt das X-NUCLEO-LPM01A Erweiterungsboard für Energiemessungen von STMicroelectronics. Dabei handelt es sich um eine programmierbare Spannungsquelle zwischen 1,8 und 3,3V, die gleichzeitig Möglichkeiten zur Messung der Energie und des Stroms bereitstellt [12]. Verschiedene Distributoren listen das Gerät mit einem Preis von etwa 80 Euro [13].

Die SMU kann in zwei Modi betrieben werden: eigenständig oder in Kombination mit einer PC-Software. Im Stand-alone-Modus wird der gemessene Strom auf dem integrierten LC-Display mit zwei Zeilen und je 16 Zeichen ausgegeben (Bild 6). Im PC-Modus ist das Board an einen Computer angeschlossen, was weitere Features wie z. B. die Visualisierung des Stroms über die Software STM32CubeMonitorPower ermöglicht. Diese kann nach kostenloser Registrierung für Windows, Linux und Mac heruntergeladen werden [14].

In beiden Modi ist sowohl die Messung von statischen als auch dynamischen Strömen möglich. Dabei unterscheiden sich jedoch die Messbereiche. Während dieser für statische Ströme zwischen 1 nA und 200 mA liegt, ist der dynamische Bereich auf 100 nA bis 50 mA limitiert.

Für genaue Messungen verfügt das Board über drei 12-Bit-Analog-digital-Konverter (ADC) [13]. Softwareseitig kann die Abtastrate zwischen 1 Hz und 100 kHz eingestellt werden. Außerdem wird zwischen zwei Modi für die Strommessung unterschieden. Im Modus „Opti(mized)“ liegt der Fokus auf der sehr genauen Messung von Strömen im Bereich zwischen 100 nA und 50 mA.

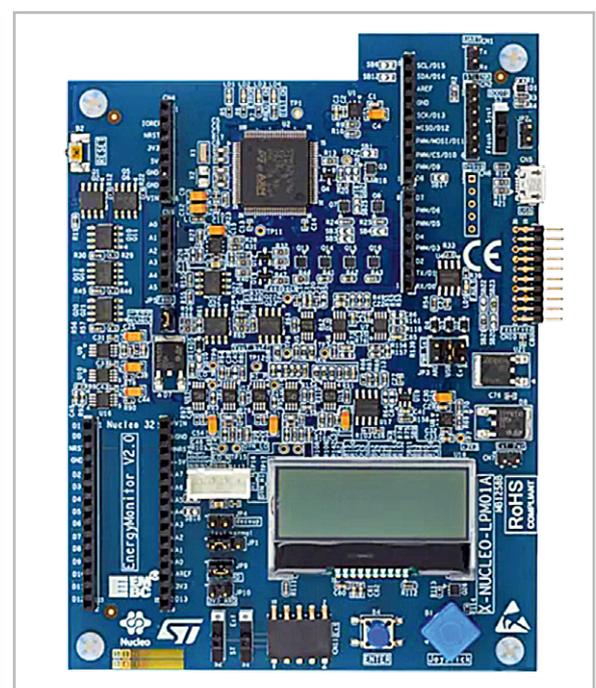


Bild 6: Erweiterungsboard für Energiemessungen ST X-NUCLEO-LPM01A

Ziel ist die Erkennung kleinster Änderungen. Treten dabei jedoch abrupte Wechsel zwischen sehr geringen und hohen Strömen auf, kann es zur Entstehung von Artefakten kommen. Der Modus „High“ ist auf größere Ströme zwischen 30 μA und 50 mA ausgelegt. Unterhalb von 30 μA kann es zu ungenauen Messungen kommen, dafür werden Artefakte im Stromverlauf vermieden. Die folgende Liste fasst weitere Parameter zusammen [15]:

- Messdauer: 0,1 s bis unendlich (eingeschränkt durch die RAM-Größe)
- Strom-Schwellwert: max. 50 mA \rightarrow Einschalten einer LED/Setzen eines Hardwaresignals
- Trigger-Quelle: Signal in der Software oder im Hardware-Pin zum Start der Messung
- Trigger-Delay: Verzögerung bis zum tatsächlichen Start der Messung

Neben der Strommessung ist auch die Messung der Leistung im Bereich von 180 nW und 165 mW und der Energieaufnahme über die Integration der Leistungsmessungen über die Zeit möglich. Für das Anlegen der Eingangsspannung stehen drei Optionen bereit: Micro-USB, externer Spannungsanschluss (7-10 V) oder über die Arduino-Uno/Nano-Pins (5 V).

Nordic PPK2

Mit dem Power Profiler Kit II (PPK2, Bild 7) bietet der Hersteller Nordic Semiconductor ein Stand-alone-Sourcemeister an, das sowohl die Strom- und Spannungsversorgung als auch die Strommessung eines angeschlossenen Geräts ermöglicht. Bei einem Preis von rund 100 Euro [17] ist das Ziel die schnelle Durchführung von Energiemessungen bei fertigen Geräten und Prototypen [18]. Der Messbereich zwischen 200 nA und 1 A ist intern in fünf Unterbereiche gegliedert, zwischen denen die SMU automatisch wechselt. Die Auflösung ist vom aktuellen Bereich abhängig, und variiert zwischen 100 nA und 1 mA. Eine Abtastrate von 100 ksps (kilosamples/second) ermöglicht die schnelle Erkennung von Änderungen.

Die Stromversorgung erfolgt über zwei Micro-USB-Buchsen. Mit einem Kabel ist die Ausgabe von bis zu 500 mA möglich, mit zwei angeschlossenen Kabeln verdoppelt sich der mögliche Strom auf bis zu 1 A. Der Spannungsbereich zwischen 0,8 und 5 V deckt viele gängige IoT-Geräte ab. Alternativ zum Sourcemeister-Modus kann das PPK2 auch als Amperemeter eingesetzt werden.



Bild 7: Nordic Power Profiler Kit II [16]

Zu den weiteren Funktionen des Nordic PPK2 gehört ein Low-End-Logic-Analyzer, mit dem code-synchronisierte Messungen möglich sind. Dies erlaubt das Auslesen von seriellen Schnittstellen wie I2C, SPI oder UART und gibt so Aufschluss über die interne Kommunikation des angeschlossenen Geräts. Während der Firmwareentwicklung können so Fehler näher eingegrenzt und behoben werden.

Die Visualisierung des gemessenen Stroms erfolgt in der Power-Profiler-App, die Bestandteil der Software nRF Connect Desktop ist. Dazu wird das Gerät über das Micro-USB-Kabel an den Computer angeschlossen. Optional ist auch der Export der Messwerte möglich [16].

Otii Arc Pro

Der Otii Arc Pro von Qoitech (Bild 8) kombiniert Funktionen für die Energieversorgung und Analyse von Geräten. Im Vergleich zu den bisher vorgestellten SMUs ist sein Preis mit rund 1000 Euro am höchsten [19]. Dafür ist der Strombereich von 0 bis 5 A deutlich größer als der der bisher vorgestellten Geräte. Die Abtastrate beträgt bis zu 4 ksps im Messbereich von ± 19 mA, in den Bereichen $\pm 2,7$ A und ± 5 A je 1 ksps. Der Spannungsbereich ähnelt mit 0,5-5 V dem des PPK2. Nur bei dieser SMU in diesem Vergleich sind konkrete Genauigkeitswerte für die Strom- und Spannungsmessung angegeben [21]:

- Strom: $\pm(0,1\% + 50 \text{ nA})$
- Spannung: $\pm(0,1\% + 1,5 \text{ mV})$

Das Einsatzgebiet des Otii Arc Pro liegt vor allem in der Geräteentwicklung. Geräte können während des Entwicklungsprozesses mit Strom und Spannung versorgt werden. Gleichzeitig sind Echtzeitmessungen oder Langzeitmessungen des Stroms möglich. Anhand der Messergebnisse können der Sleep-Strom und die allgemeine Gerätelaufzeit optimiert werden, um so energieeffiziente Hard-, Firm- und Software-Designs zu erstellen.

Ein wesentlicher Unterschied zu den anderen beiden Sourcemeistern liegt in der Fähigkeit des Otii Arc Pros, nicht nur Strom und Spannung bereitzustellen, sondern diese auch aufzunehmen (max. 2,5 A/5 V). Dies entspricht den Quadranten II und IV aus Bild 3. Dadurch ergeben sich Anwendungsfälle für die Laufzeitberechnung von Batterien oder die Berechnung des Energieertrags durch Energy-Harvesting in Form einer Solarzelle.

Durch die integrierten Logik-Pins sind UART-synchronisierte Messungen möglich, um genauer nachzuverfolgen, welcher Code-Abschnitt für den momentanen Strom verantwortlich ist.

Fazit

Der Vergleich der drei vorgestellten Sourcemeister zeigt, dass sich die Geräte in vielen Bereichen, begonnen mit dem ersten Eindruck der Hardware über die Auflösung bis hin zum Strom- und Spannungsbereich, teils deutlich unterscheiden.

Das STX-NUCLEO-LPM01A-Board bietet eine preiswerte Möglichkeit, die Ströme eines angeschlossenen Geräts zu messen. Besonders interessant ist die hohe Abtastrate von 3,2 Msps, die es

ermöglicht, auch minimale Änderungen zu erfassen. In der Praxis ist die Software intuitiv zu bedienen, und allgemein fügt sich die SMU gut in eine Umgebung mit weiteren ST-Komponenten ein. Abstriche müssen beim Spannungsbereich und insbesondere beim Strombereich hingenommen werden. Bei Prototypen, die stromintensive Sensoren oder beispielsweise ein GPS-Modul verwenden, wird schnell die Grenze von 50 mA erreicht.

Der Otii Arc Pro von Qoitech zeichnet sich durch eine hohe Verarbeitungsqualität und einen größeren Strom- und Spannungsbereich aus. Insbesondere der maximale Strom von 5 A sollte für alle gängigen IoT-Applikationen ausreichen und übertrifft die anderen beiden untersuchten SMUs deutlich. Die Abtastrate ist mit max. 4 ksps jedoch mit Abstand am geringsten. Durch den großen Funktionsumfang, aber auch den hohen Preis richtet sich das Produkt vorrangig an die Industrie und weniger an Privatpersonen.

Das Power-Profiler-Kit II von Nordic Semiconductors erweist sich auf Basis des Vergleichs als Preis-Leistungs-Sieger. Insbesondere im Vergleich zum ST-Board ist das PPK2 deutlicher als eigenständiges Produkt zu erkennen. Der Strombereich bis 1 A in Kombination mit einer Abtastrate von 100 ksps ist



Bild 8: Otii Arc Pro [20]

ausreichend für den Großteil der Messungen. Hervorzuheben ist auch der einfache Umgang mit Hard- und Software.

Ausblick

In diesem Beitrag wurden die wichtigsten Grundlagen sowie der Aufbau und das Funktionsprinzip eines Sourcemeters beschrieben. Außerdem wurden einige Spezifikationen beleuchtet, anhand derer exemplarisch drei Sourcemeter miteinander verglichen wurden. Im nächsten ELVJournal wird die Durchführung einer praktischen Strommessung beschrieben. Interessante Aspekte sind dabei vor allem der Messaufbau, die Einflussfaktoren und die Erkenntnisse aus der Auswertung der Messung. **ELV**

i Weitere Infos

- [1] <https://www.meilhaus.de/news-aktionen/blog/blog-smu/>
- [2] <https://www.youtube.com/watch?v=qL4XA5eeUTQ>
- [3] <https://www.sglabs.it/en/product.php?s=httpswwwsglabsitenproductphpgskeithley-236id1916&id=1916>
- [4] <https://www.manualslib.com/manual/529475/HP-4145a.html>
- [5] https://xdevs.com/doc/HP_Agilent_Keysight/4145A/HP_4145A_service_manual.pdf
- [6] https://download.tek.com/manual/236_900_01E.pdf
- [7] <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/studentzone/studentzone-december-2017.html>
- [8] <https://www.all-electronics.de/elektronik-entwicklung/source-measure-unit.html>
- [9] <https://www.youtube.com/watch?v=deiM6wwCxIU>
- [10] <https://www.ni.com/de-de/shop/electronic-test-instrumentation/source-measure-units/what-are-source-measure-units.html>
- [11] <https://www.sourcetric.com/glossar/aufloesung-und-genauigkeit-messgeraet/>
- [12] <https://www.st.com/en/evaluation-tools/x-nucleo-lpm01a.html>
- [13] https://www.mouser.de/ProductDetail/STMicroelectronics/X-NUCLEO-LPM01A?qs=1mbolxNpo8cN%252BsJbGWLJQ%3D%3D&mgh=1&vip=1&gclid=EAlaIqObChMlmbvz75Su_wIVkNZ3Ch1e9AfrEAQYASABEgLLI_D_BwE
- [14] <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemonpwr.html#overview>
- [15] https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2202-stm32cubemonitorpower-software-tool-for-power-and-ultralowpower-measurements-stmicroelectronics.pdf
- [16] <https://www.nordicsemi.com/Products/Development-hardware/Power-Profiler-Kit-2>
- [17] https://www.digikey.de/de/products/detail/nordic-semiconductor-asa/NRF-PPK2/13557476?utm_adgroup=&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=PMax%20Shopping_Product_Medium%20ROAS&utm_term=&productid=13557476&gclid=EAlaIqObChMlibfxIsiw_wIV0e93Ch2PhQ2jEAQYASABEgI2hPD_BwE
- [18] https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fug_ppk2%2FUG%2Fppk%2FPPK_user_guide_Intro.html
- [19] https://www.digikey.de/de/products/detail/qoitech-ab/OTII-ARC-PRO/16840742?utm_adgroup=&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=PMax%20Shopping_Product_Medium%20ROAS&utm_term=&productid=16840742&gclid=EAlaIqObChMlnLDW4Miw_wIVFPN3Ch017we4EAQYASABEgI7hPD_BwE
- [20] <https://www.qoitech.com/products/>
- [21] <https://www.qoitech.com/otii-arc-pro/>

Alle Infos finden Sie auch online unter: de.elv.com/elvjournal-links