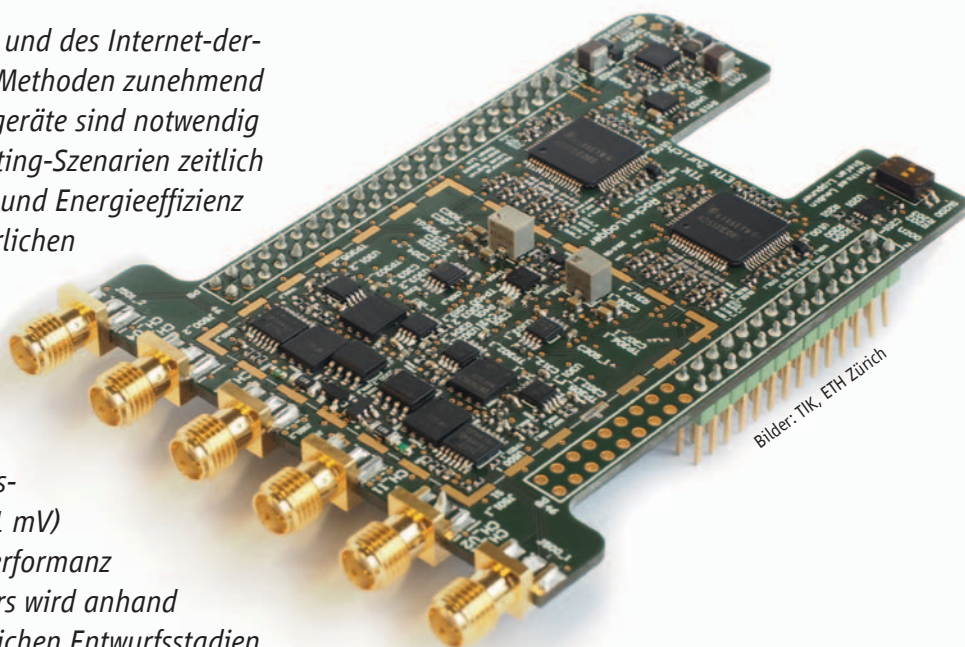


In-situ-Validierung von Energy-Harvesting

Mit dem Aufkommen von Wearables und des Internet-der-Dinge gewinnen Energy-Harvesting-Methoden zunehmend Relevanz. Schnelle wie präzise Messgeräte sind notwendig um die rasch veränderlichen Harvesting-Szenarien zeitlich aufzulösen, sowie deren Leckströme und Energieeffizienz zu charakterisieren. Mit den erforderlichen Experimenten wächst die Nachfrage an kompakten und tragbaren Testlösungen zur In-situ-Messung von Leistungs- und Umgebungsparametern. Der Rocket-Logger ist so ein Gerät, zur Leistungsmessung im Bereich von 4 pW (bei 1 mV) bis hin zu 2,75 W (bei 5,5 V). Die Performanz und Funktionalität des RocketLoggers wird anhand dreier Anwendungen in unterschiedlichen Entwurfsstadien evaluiert.



Lukas Sigrist et al.,
Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), ETH Zurich

Mit dem Fortschritt der Low-Power-Embedded-Technologien besserten sich die Batterielaufzeiten erheblich. Allerdings fordert der Einsatz in schwer zugänglichen Umgebungen und die steigende Geräteanzahl im sichtbar werdenden Internet-der-Dinge, nahezu unbeschränkte Lebensspannen: Eine Energieversorgung ausschließlich über Batterie scheidet damit aus. Die Forschungsaktivität hinsichtlich beider Schlüsselkonzepte Energy-Harvesting und ULP-Design, stieg daher innerhalb der letzten Jahre rapide.

Leider entsteht mit Energy-Harvesting eine zusätzliche Komplexitätsebene im Entwurfsprozess, applikationsspezifische Umweltbedingungen nehmen direkten Einfluss auf Parameter wie Energiegewinnung oder Leistungseffizienz. Harvesting-basierte Systeme müssen mit einem weiten Dynamikbereich der Versorgungsströme, von nW hin zu mW, umgehen können und gleichzeitig eine effiziente Energienutzung

garantieren. Nur anwendungsspezifische Lösungen erfüllen diese Performanzkriterien unter Umgebungseinflüssen. Nach unseren Erfahrungswerten in den Bereichen Remote-Sensing [1], Harvesting-Design [2], Dimensionierung [3] und Management [4] sowie Wearables [5], haben diese Systeme ein gängiges Entwurfsproblem gemein: Unabhängig von der Entwurfsstrategie mangelt es an präziser Charakterisierung des umgebungsabhängigen Energiebedarfs, bzw. der Charakterisierung und Optimierung der Aktiv- und Ruhestrome.

In den Systementwurf gehen typischerweise geschätzte Umgebungsparameter wie Lichtstärke, Temperaturgradient, Vibrationsenergie oder Druckänderungen ein. An Prototypen werden Metriken wie Ernteeffizienz, Versorgungsleckströme, oder Betriebs- wie Ruhestrome der Einzelkomponenten betrachtet. Diese Messungen adressieren stark variierende Ströme: Vom nA- bis μ A-Bereich im Ruhemodus, hin zu mehreren 100 mA im Betrieb. Zur Charakterisierung solcher Anwendungen in der Produktionsumgebung

ist das Messgerät in eben diese einzubetten. Während Leistungs- und Umweltparameter wohl-bekannte Messaufgaben stellen, sind tragbare Geräte zur präzisen wie verlässlichen Charakterisierung harvestingbasierter Systeme ein Novum.

Low-Power-Systeme werden für gewöhnlich mit taktzyklengenaue Echt-Zeit-Messung im Labor validiert [6]. Zum Test der eingebetteten Systeme einschließlich Harvesting unter Umgebungseinflüssen sind neue Werkzeuge notwendig. Der Entwurf solcher Geräte, die stark variierende Leistungen und Umgebungsbedingungen über lange Perioden aufzeichnen, ist eine anspruchsvolle Aufgabe: Die Beeinflussung der Last durch das Messgerät soll möglichst gering ausfallen. Das Gerät muss unabhängig von der Last betrieben werden, weiterhin sind großer Datenspeicher und/oder Konnektivität nötig. Sonst wird der Speicher knapp, das Gerät nicht unter kritischer Stromversorgung funktionieren oder die Harvesting- wie Konversionseffizienz signifikant beeinflusst.

Damit muss das Messgerät selbst portabel und wiederaufladbar sein, Leckströme wie Spannungslasten vermeiden. Die Abstraten müssen zur Darstellung arbeitszyklischer Systeme ausreichen. Weiterhin ist zur Vermeidung transienter Messfehler der Messbereich hinreichend schnell umzuschalten. Die gewonnenen Daten nützen nicht nur zur Validierung, sondern auch zur iterativen Designverbesserung. Der RocketLogger fokussiert auf solche langzeitige In-situ-Messaufgaben. Simultan zeichnet er vier Spannungs- und zwei Stromkanäle hinreichend präzise auf. Er schließt die Lücke zwischen hochperformanten Laborgeräten und hochmobilen Leistungsmessschaltungen in der Harvesting-Systementwicklung.

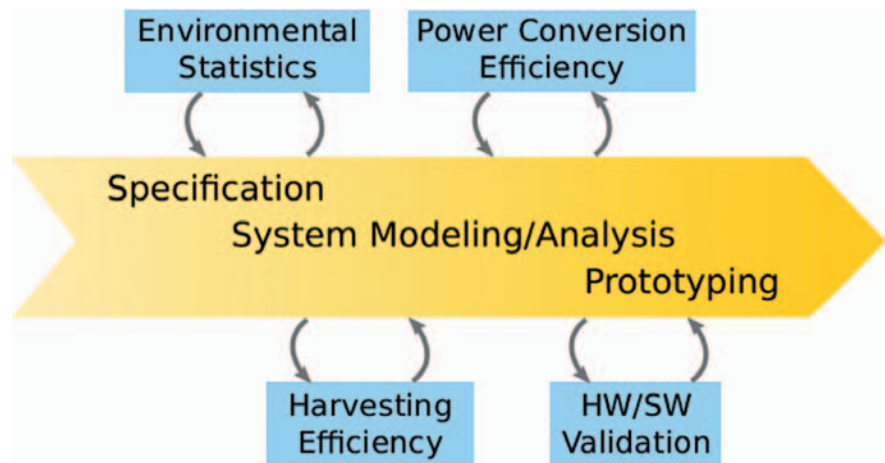


Bild 1: Entwurfsaspekte harvesting-basierter Systeme. Kästen zeigen disjunkte Messaufgaben.

■ Harvesting-Entwurf

Viele Parameter nehmen direkten Einfluss auf einen autonomen, harvestingbetriebenen Sensorknoten. Die Übertragungs- und Umwandlungseffizienz hängt beispielsweise stark von Umgebungsparametern wie Licht, Bewegung, Temperatur oder Druck ab. In vielen Fällen, zum Beispiel bei tragbaren oder integrierten Geräten, gestaltet sich die Umgebung nicht als leicht vorhersagbare Variable: Deshalb erfolgen zur repräsentativen Statistik zahlreiche In-situ-Messungen, die in den Embedded-Entwurfsprozess (Bild 1) einfließen. Unterschiedliche Phasen im Entwurfsprozess fordern verschiedene Messaufgaben: Von der Umgebungsstatistik zur Effizienz und der HW/SW-Validierung unterschiedlicher Komponenten oder Prototypen. Derzeit fehlt es an Geräten, welche die Anforderungen aller dieser Entwurfsaspekte, vereinen.

■ Marktlösungen

Zur Leistungsanalyse existieren viele Geräte variabler Größe und Funktionalität. Laborgeräte wie die Präzisions-Multimeterreihen Keithley-2000 oder Keysight-34400 liefern schnelle und präzise Messergebnisse [7, 8], sie gestalten sich aber in der In-situ-Messung unhandlich und benötigen eine Standardnetzversorgung.

Die spezifischen Anforderungen der Harvesting-Forschung wurden jüngst mit neuen Werkzeugen adressiert. Diese werden lose klassifiziert in:

■ Online-Energiezähler:

Die einfachen Messschaltungen, variieren von Shunts [9], [10] bis Coulombzählern [11],[12]. Unter großem Dynamikbereich gelangt die Energieinformation über einen einzigen

Stromkanal zum Sensorknoten. Mit ihrer Anbindung an die Last fällt deren Eigenständigkeit und Integrität unter kritischer Stromversorgung. Damit ist keine Langzeitstatistik erfassbar.

■ Embedded-Power-Logger:

Mit großem Dynamikbereich, einer Übertragungsmöglichkeit, eigener Stromversorgung und Datenspeicher gestalten sich diese Geräte komplexer als die Online-Energiezähler. Einsatzmöglichkeiten sind die Messung des Energieumsatzes drahtloser eingebetteter Systeme [13,14], oder die Leistungsanalyse von Smartphones [15]. Allerdings taugen sie nur für batteriebetriebene Knoten mit geregelter Versorgungsspannung. Zur Validierung von Harvesting-Systemen muss die Leistung aus unabhängiger

Anzeige

TRACE32® Wir sind bereit für Ihr nächstes Projekt!

**Debuggen über
Intel® DCI (USB)
für Intel® Prozessoren**



www.lauterbach.com/7384.html

LAUTERBACH
DEVELOPMENT TOOLS

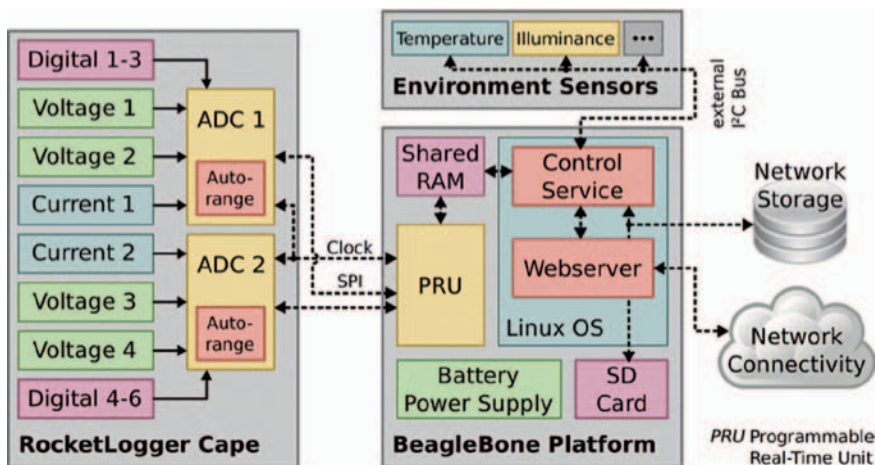


Bild 2: Überblick über die RocketLogger Systemarchitektur.

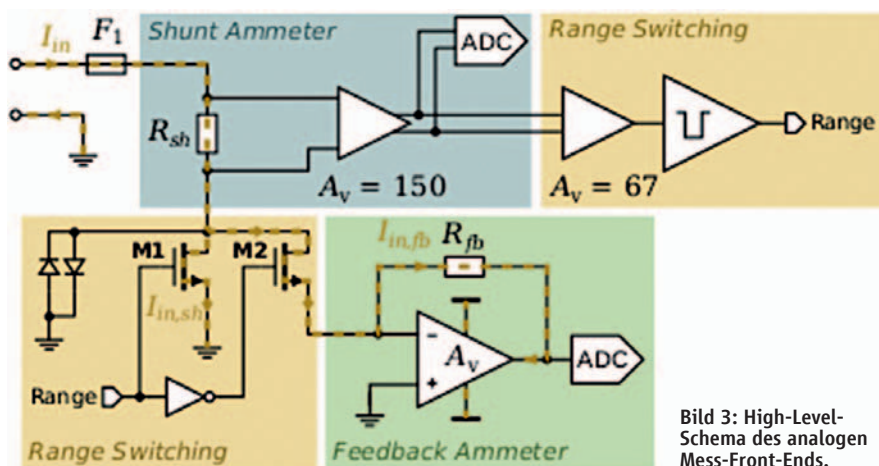


Bild 3: High-Level-Schema des analogen Mess-Front-Ends.

Spannungs- und Strommessung unter Erfassung der Umgebungsbedingungen bestimmt werden.

■ Testbeds:

Diese Plattformen sind ebenfalls externe Geräte, welche unterschiedliche Parameter auf einem oder mehreren Sensorknoten überwachen. Flocklab [16] erfasst logische Ereignisse, steuert GPIO-Pins und misst den Energieumsatz verteilter Sensorknoten. Ein In-situ-Testbed für IoT-Knoten ähnlicher Funktionalität ist das an autonome Systeme gerichtete SmartEye [17]. Hier ist es schwierig, die für kontrollier- und reproduzierbare High-Level-Service-Tests nötige Synchronizität wie Energieeffizienz aufrecht zu erhalten.

■ Systemarchitektur

Das Testen und Validieren harvesting-basierter Systeme stellt also eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Dazu ist portable, kos-

teffiziente Ausrüstung mit großer Anzahl hoch-präziser Spannungs- wie Stromkanäle, gefragt. Damit sind viele spezifische Funktionen von Beginn an im Entwurfsprozess zu berücksichtigen. Zur präzisen Strom- und Spannungsmessung mit weiter Dynamik ist ein spezifisches, kommerziell nicht verfügbares, Analog-Front-End nötig. Weiterhin messen unterschiedliche digitale Sensoren, Umgebungsdaten wie Temperatur, Lichtstärke oder den Atmosphärendruck über ein einziges Bussystem. Die große Datenmenge fordert ein Betriebssystem, das synchron Daten sammelt und die unterschiedlichen Messschaltungen sowie den Datenspeicher kontrolliert. Zur Gewährleistung des tragbaren Formfaktors wurde die BeagleBone Green [18] Embedded-Linux-Plattform gewählt. Fernzugriff und Datenspeicherung erfolgt auf der Basis eines Linuxsystems. Den Architekturüberblick zeigt Bild 2.

Im Folgenden werden die Herausforderungen bei der Integration jeder Architektur-Komponente diskutiert.

■ Messung niedriger Ströme

Mit den ersten Entwurfsentscheidungen und Prototypen ist die Messung der gewonnenen Harvestingenergie essenziell. Low-Power-Szenarien und der verbesserte Ruhestrom aktueller Mikrocontroller fordert Strommessung bis zur 10-nA-Skala. Zur Messung solcher Ströme unter geringer Beeinflussung des DUTs dient eine rückgekoppelte Amperemeter-Schaltung [19, Kap. 1]. Die OPV-basierte Schaltung misst mit der großen Verstärkung unter Rückkopplungswiderstand $R_{fb}=680\ \Omega$ im nA-Bereich. Der Spannungsabfall unter A/D-Wandler-Messung erfolgt daher am OPV-Ausgang, ohne Auswirkungen auf den Eingang.

Da der gemessene Strom durch den OPV fließt, wird er durch dessen Ausgangseigenschaften limitiert: Der Dynamikbereich dieser Schaltung ist auf $\pm 2\text{ mA}$ begrenzt. Über diesen Bereich hinaus ist das Feedback-Amperemeter zu deaktivieren oder überbrücken, damit die OPV-Sättigung nicht zu einem unkontrollierbar großen Spannungsabfall am Eingang führt. Dies gewährleistet ein Umschaltkreis.

■ Messung hoher Ströme

Eine konventionelle Shunt-Amperemeter-Schaltung misst aktive Ströme über 2 mA hinaus. Der Shunt-Widerstand von 50 m Ω hält den Spannungsabfall am Eingang niedrig und minimiert den Einfluss auf das DUT. Ein Messverstärker erfasst den Spannungsabfall über den Widerstand unter A/D-Wandlung, zur Strommessung im Bereich von 2 mA bis 500 mA, mit 10- μ A-Grundrauschen.

■ Umschalten der Messbereiche

Zur Reduktion der Schaltstörungen auf die transiente Messung ist die Umschaltautomatik in das analoge Front-End integriert (Bild 3). Damit wird das Feedback-Ampere-meter hinreichend schnell unter starken Stromspitzen deaktiviert, bevor es große Spannungseinbrüche bewirkt - etwa beim Erwachen aus dem Ruhemodus.

Das verstärkte Ausgangs-Shunt-Signal bestimmt den Messbereich: Auch unter erheblichem SNR bei kleinen Strömen, behält das Signal zur Detektierung der Schaltvorgänge, bis hin zu zwei Größenordnungen über dem Rauschuntergrund, Integrität. Der Schalt-detektor nutzt eine Komparatorschaltung. Im Bereich unter-

halb von 2 mA wird MOSFET M2 aktiviert, um die Ströme durch das Amperemeter zu leiten.

Größere Ströme werden über M1 am Amperemeter, zur Vermeidung hoher Spannungseinbrüche durch OPV-Sättigung, vorbei geführt. Das Shunt-Amperemeter bleibt zur Detektierung der Schaltschwellen ständig aktiv. Ebenfalls wird das Schaltsignal der MOSFETs aufgezeichnet, um später daraus die entsprechenden Messkanäle zur Datenanalyse zu wählen.

■ Spannungsmessung

Da Harvesting-Lösungen nicht über eine regulierte Spannungsversorgung verfügen, muss auch deren Spannungsverhalten über einen langen Zeitraum erfasst werden. Sowohl Versorgungs- als auch Anwendungskomponenten besitzen zeitabhängige Arbeitspunkte, die deren Energieeffizienz direkt beeinflussen.

Die Spannungssignale benötigen keinen großen Dynamikbereich: Präzisions-A/D-Wandler erfassen direkt Spannungen von 10 μ V bis hin zu einigen Volt. Wichtig sind dabei sehr kleine Eingangsleckströme, um die parallele Strommessung im nA-Bereich nicht zu beeinflussen.

■ Datenakquise

Über die Strom- und Spannungsmessung hinaus tasten sechs Digitalkanäle den DUT-Zustand ab. Diese Messungen werden um essenzielle Umgebungsdaten aus Temperatur-, Lichtstärke-, Druck- wie Rotationssensoren ergänzt.

Zur Kontrolle und Koordination aller Messungen läuft ein Hintergrundprozess auf dem Linux-Betriebssystem. Dieser Service verarbeitet die Umgebungsdaten bei niedriger Rate direkt: Analog- wie Digitalkanäle tasten mit bis zu 64 kS/s ab, sehr kurze Prozesse werden mit maximal 13 Mb/s Messdaten erfasst.

Weil das Auslesen dieser A/D-Wandlung mit geringer Latenz erfolgen muss, werden die Datentransfers durch die programmierbare Echtzeiteinheit des Beagle-Bone-Prozessors kontrolliert. Dabei sind die Daten vor Verarbeitung im Arbeitsspeicher hinterlegt. Der Kontrolldienst kombiniert anschließend die Leistungs- mit den Umgebungsdaten und konvertiert die A/D-Daten anhand der Kalibrierung vor dem Abspeichern im Dateisystem.

■ High-Level-Dienste

Ein Datenlogger für Harvesting-Systeme adressiert tragbare In-situ-Messung: Das bedeutet die Datenakquise im Fernzugriff. Zusätzlich zur Konnektivität des Betriebssystems ist daher auch ein Webinterface integriert: Darüber werden Messparameter wie Abtastrate und Messkanäle, Start/Stop-Zeitpunkt, gesetzt, oder die Messdaten heruntergeladen. Auch eine online-Vorschau der laufenden Messungen ist möglich. Weiterhin können die Daten an ein Netzlaufwerk übergeben werden, für Langzeitmessungen, welche die Kapazität einer gewöhnlichen SD-Karte übersteigen, ein wichtiges Feature.

■ Vergleiche mit bisherigen Lösungen

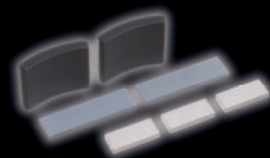
Der RocketLogger erfüllt die Anforderungen für langzeitige In-situ-Messungen an Leistungs- wie Umgebungsdaten in

Attracting Tomorrow



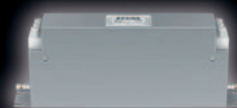
TDK Technology Advancing power solutions.

Rare earth magnets with high magnetic field strength for wind power generators



Aluminum electrolytic capacitors and film capacitors for high ripple currents

Surge arresters and varistors with long-term reliability



EMC and sine-wave filters for currents up to 8 kA

Charakteristik	Keithley Digital Multimeter [7]	RocketLogger	Embedded Power Logger (Nemo [9])
Spannungsbereich / Präzision	1 nV - 1100 V / 0,004 % +1,2 μ V	6 μ V - 5,5 V / 0,02 % +13 μ V	keine Spannungsmessung
Strombereich / Präzision	10 pA - 2,1 A / 0,05 % +1,2 nA	1 nA - 500 mA / 0,09 % +4 nA	0,1 μ A - 202 mA / 1,34 % im Mittel, 8 % max.
Abtastrate	bis zu 2 MS/s	bis zu 64 kS/s	bis zu 100 kS/s
Beeinflussung	Eingangswiderstand >100 G Ω Spannungslast $\leq$ 350 mV	Eingangswiderstand 1 T Ω Spannungslast $\leq$ 53 mV	Spannungslast $\leq$ 130 mV
Formfaktor	Laborgerät	tragbares Gerät	eingebettete Messtechnik
Stromversorgung	Netzanschluss	Batterie	über die Applikation versorgt
Fernzugriff	voller Zugriff	Datenakquise und Steuerung	keiner
Umgebungsparameter	Temperatur (über Spannung)	digitale Sensorik	keine
Modifizierbarkeit	keine, modulares System	jede Linuxschnittstelle	Firmware
Kosten pro Kanal (Schätzung)	\$ 4900 - \$ 7300	\$ 50	\$ 10

Tabelle 1: Funktionalitätsvergleich zwischen dem RocketLogger und Marktlösungen.

Harvesting-Systemen, mit einem Spagat zwischen Messperformanz, Tragbarkeit und Funktionalität. In den Punkten Performanz und Tragbarkeit ist er zwischen stationären Lösungen und Embedded-Power-Loggern einzuordnen, wie der Vergleich in Tabelle 1 zeigt.

Darüber hinaus bietet der RocketLogger Schlüsselfunktionalitäten weit über die Marktlösungen.

■ Performanz – Setup und Kalibrierung

Vor der Performanzanalyse wird der RocketLogger kalibriert. Die linearen Kanäle werden dabei auf Offset und Verstärkung geeicht. Das

leistet eine Keithley-2450-SMU, mit stufenweiser Strom- und Spannungseingabe: 2-mA-Schritte für hohe Ströme, 20- μ A-Schritte für niedrige Ströme, 100-mV-Schritte zur Spannungskalibrierung. Die Kalibrierungsmessung wurde mit MATLAB analysiert und für jeden Strom- und Spannungswert, zur Evaluierung kanalspezifischer Kalibrierungsparameter, gemittelt. Die Performanz wird anhand dreier Metriken für Strom- und Spannungskanäle bewertet: Messpräzision, Grundrauschen und Bandbreite. Zusätzlich wird die Umschaltzeit und der Eingangsspannungsabfall für den Strommesskreis, sowie der Eingangsleckstrom für die Spannungskanäle, bestimmt. Die Präzisionsmessung erfolgte ebenso mit der SMU. Das Rauschniveau wurde unter

Null-Eingangsspannung/Strom bestimmt. Die Charakterisierung der Kanalbandbreite erfolgt mit dem Signalgenerator Agilent 33.600A, bei Frequenzen von 0 kHz bis 50 kHz, sowie Amplituden von 40 mA und 1 V. Der MSO4104B von Tektronix misst Schaltzeit und den transienten Spannungseinbruch in Stufen von 0 mA bis 500 mA.

■ Performanz der Spannungsmessung

■ DC-Präzision: Die Präzision der Spannungsmessung wurde 24 Stunden nach Kalibrierung mit dem gleichen Spannungsschritten über den gesamten Messbereich erfasst und die absoluten

Komponente	Metrik	Bereich/Wert
General	Abtastrate Aufgezeichnete Daten Formfaktor	1 kS/s bis zu 64 kS/s bis zu 8,29 GB/h 103 mm $\times$ 68 mm
Spannung $\pm$ 5,5V (4 $\times$)	Rauschen Eingangsleckstrom Bandbreite Präzision (24 h)	5,9 μ V _{RMS} (1,38 mV _{RMS}) $\sim$ 5 pA 262 Hz (10 kHz) 0,02 % +13 μ V
Strom $\pm$ 500 mA (2 $\times$)	Voller Dynamikbereich Spannungslast bei 500 mA Rauschen im hohen Bereich Niedriger Strombereich Rauschniveau im niedr. Strombereich Umschaltzeit Transiente Spannungslast Bandbreite Präzision im niederen Bereich (24 h) Präzision im hohen Bereich (24 h)	172 dB 53 mV 1,34 μ A _{RMS} (50,6 μ A _{RMS}) $\pm$ 2 mA 1,33 nA _{RMS} (276 nA _{RMS}) 1,4 μ s max. 430 mV für $\leq$ 1,4 μ s 262 Hz (9,5 kHz) 0,03 % +4 nA 0,09 % +3 μ A
Digitale Eingänge (6 $\times$)	Eingangsleckstrom Schwellspannung	<1 pA konfigurierbar von -6 V bis 6 V

Tabelle 2: Charakteristische Werte des RocketLoggers. Rauschniveau und Bandbreite sind bei 1 kS/s und 64 kS/s gezeigt.

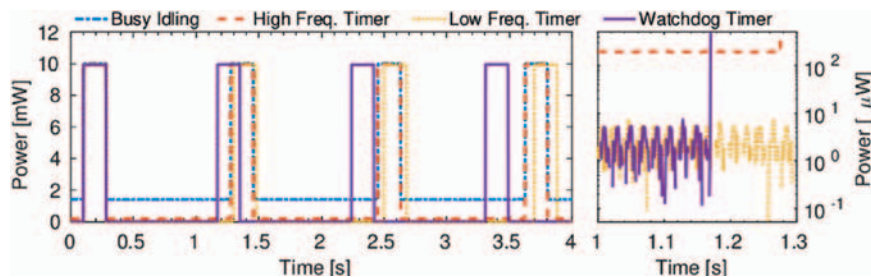


Bild 4: Vergleich der Transienten von Ruhe- zu Aktivstrom vierer Implementierungen, bei 1 kS/s. Rechts: Detailansicht der Ruhephase der drei Takte niedrigster Leistung.

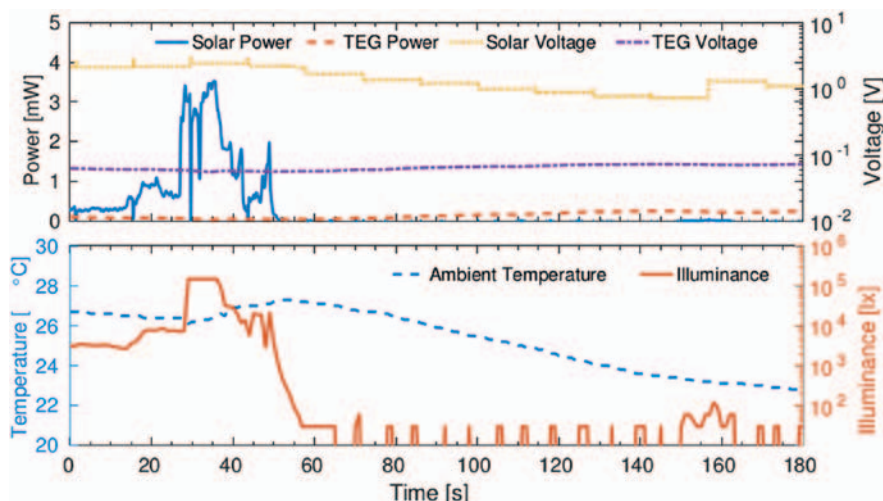


Bild 5: Harvesting-Leistung und Umgebungsbedingungen eines Armbands unter realen Testbedingungen.

Spannungswerte mit gesetzten Werten verglichen. Die Messpräzision entspricht $0,02\% \pm 13 \mu\text{V}$.

■ Untergrundrauschen:

Unter NULL-Eingangsbedingungen misst das Untergrundrauschen bei 1 kS/s $5,9 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$.

■ Bandbreite:

Die analoge Bandbreite wurde im Frequenzbereich von 0 Hz bis 50 kHz evaluiert. Im Ergebnis entspricht die Bandbreite der des spezifizierten A/D-Wandler-Tiefpassfilters: Bei 64 kS/s beträgt die -3 dB-Frequenz 10 kHz. Bei

1 kS/s reduziert sich die Bandbreite auf 262 Hz.

■ Eingangsleckströme:

Bei der maximal möglichen Eingangsspannung von 5,5 V beträgt der Leckstrom etwa 5 pA, das entspricht einer Eingangsimpedanz von 1 TΩ.

■ Performanz der Strommessung

■ DC-Präzision:

Mit dem analogen Messaufbau zur Strommessung beträgt die Präzision

$0,03\% \pm 4 \text{ nA}$ im niedrigen und $0,09\% \pm 3 \mu\text{A}$ im hohen Strombereich.

■ Rauschuntergrund:

Unter NULL-Eingangsbedingungen beträgt das RMS-Rauschen bei 1 kS/s im niedrigen und hohen Spannungsbereich $1,33 \text{ nA}$ beziehungsweise $1,34 \mu\text{A}$.

■ Bandbreite:

Die -3 dB Frequenz bei 64 kS/s beträgt 9,5 kHz. Bei niedrigeren Abtastraten entspricht die Bandbreite wieder der des A/D-Wandlers, 262 Hz bei 1 kS/s.

■ Spannungseinbruch:

Die Strommessbereiche zeigen lineares Verhalten über den gesamten Messbereich, mit dem 53-mV-Maximum bei 500 mA. Das entspricht einer Impedanz von 106 mΩ.

■ Umschaltzeit

Mit nur $1,4 \mu\text{s}$ nach Schaltschwellenergebnis schaltet der MOSFET vom niedrigen in den hohen Strommessbereich. Damit antwortet der Schaltmechanismus im Front-End eine Größenordnung schneller als das Abtastintervall der höchsten Tastfrequenz. Der Spannungsabfall in dieser kurzen Zeit bewegt sich unterhalb von 185 mV für Ströme bis zu 100 mA, sowie 430 mV für maximale Stromimpulse bis 500 mA.

■ Zusammenfassung

In der *Tabelle 2* sind die Charakteristika des RocketLoggers mit zusätzlichen Werten für die höchste Abtastrate zusammengefasst. Mit der gezeigten Präzision, dem großen Dynamikbereich und nur $103 \text{ mm} \times 68 \text{ mm}$ Formfaktor, schließt der RocketLogger die Lücke zwischen performanten Laborgeräten und ganzheitlich eingebetteten Messschaltungen. Damit können Harvesting-Lösungen über

Anzeige

Enabling an intelligent Planet powered by Advantech

Q S E V E N



Reduce total cost of ownership



Longtime availability



Platform independent



Proven and easy integration

SOM-3569

- Intel® Atom E3900 Series, Pentium® N4200 and Celeron® N3350
- Supports iManager WISE-PaaS/RMM
- Embedded Software APIs
- HEVC/H.265, H.264 MPEG2 HW Decode
- Onboard LPDDR4 up to 16GB
- eMMC up to 64GB

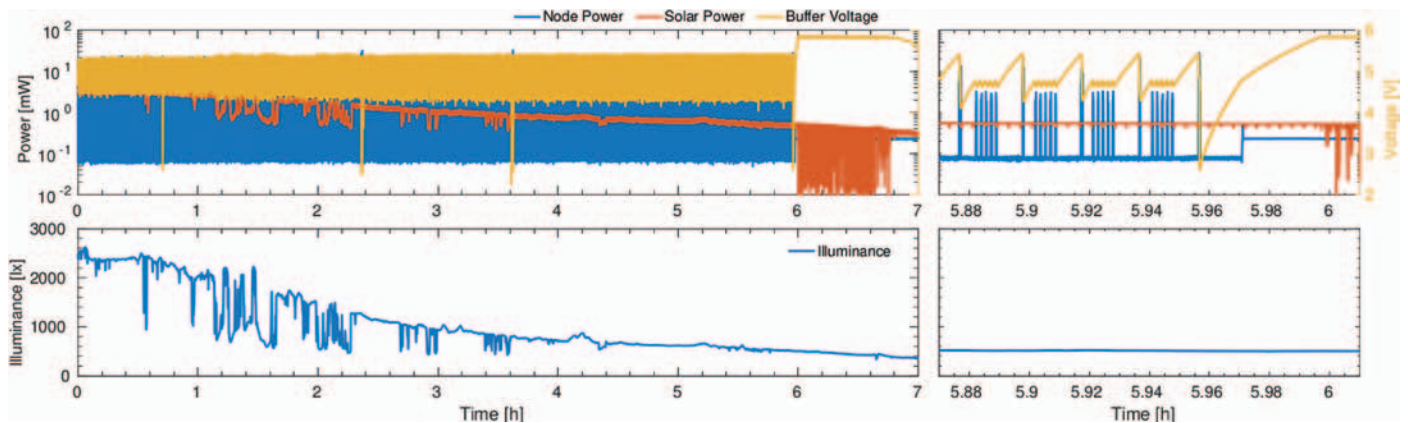


Bild 6: Erfassung eines seltenen Fehlers nach 56 Stunden In-situ-Aufzeichnung.

den gesamten Entwicklungsfluss evaluiert werden.

Anwendungsberichte

Wir diskutieren einige den Entwurfsprozess unterstützende Alleinstellungsmerkmale der Testlösung.

Low-Power-Optimierung

Das gewöhnliche Prototyping optimiert die Ruhezustände zwischen den beiden Extrema, minimaler Ruhestrom und präzises Timing. Das fordert ULP-Messfähigkeit und schnelles Umschalten zwischen den Messbereichen.

Im Beispiel liegt eine einsekündige Ruhephase zwischen der Auftragsausführung. Das Experiment simuliert aktive Aufträge mit dem Anschalten zweier LEDs auf der MSP430-Plattform. Bild 4 zeigt den aufgezeichneten Energieumsatz von vier unterschiedlichen Implementierungen dieses Anwendungsszenarios. Das rechte Bild zeigt den zweiten Schaltvorgang im Detail.

»Busy Idling« bezeichnet den Leerlauf bei 8 MHz zwischen zwei Aufgaben, »High Freq. Timer« den Ruhemodus unter 1 MHz Taktfrequenz, »Low Freq. Timer« den analogen Zustand bei 9,6 kHz, »Watchdog Timer« einen Watchdog mit selber Frequenz. Das Diagramm und die ULP-Ergebnisse zeigen den Unterschied zwischen präzisiertem Ruheversatz und ULP-Energieumsatz der unterschiedlichen Takte, mit der Ausnahme »Active Idling«, das keinen LP-Prozess bedeutet.

Im Prototyping ist der große Dynamikbereich unserer Messlösung zur Verifikation und Optimierung verschiedener LP-Designs essenziell.

Wearables mit mehreren Quellen

Eine wichtige Phase im Harvesting-Systementwurf ist die Durchführung und Charakterisierung des Prototypen unter realen Bedingungen. Für tragbare Geräte gestaltet sich das, wegen ihrer starken Zeitabhängigkeit, oft schwierig.

Weiterhin muss zur In-situ-Validierung auch das Prüfgerät vom Nutzer getragen werden. In diesem Anwendungsfall wird ein Harvesting-Armband mit Solarzellen und thermoelektrischen Generatoren (TEG) geprüft. Der Prüfling bewegt sich zunächst bei warmen Temperaturen im Freien, bevor er einen kühleren Raum betritt. Bild 5 zeigt die Harvesting-Erträge und Umgebungsbedingungen im oberen und unteren Bereich. Die TEG-Leistung liegt im Bereich einiger 100 μ W, die Solarleistung im Bereich einiger mW. Auf der rechten vertikalen Achse sind die Betriebsspannungen von Solarzelle und TEG verzeichnet, die Solar-Energie dominiert im Freien, der TEG im Zimmerbetrieb.

Solche Daten sind für die Iteration des Entwurfsprozess, zur Optimierung der Ernteeffizienz, unverzichtbar. Ohne unabhängige, synchrone Messung vieler Spannungs- und Stromkanäle und der Umgebungsdaten ist das Armband im Feld nicht präzise zu evaluieren.

Langzeit-In-situ-Messung

Im finalen Prototyping wird das System im Feld geprüft und validiert. Das erfordert eine Langzeitmessung: Bild 6 zeigt einen siebenstündigen Ausschnitt eines tagelangen Experimentes zur Validierung des solarbetriebenen Sensorknotens. Der Harvesting-Schaltkreis sammelt langsam

Energie in einem Speicherkondensator. Je nach Spannungsniveau wird ein Mikrocontroller zur Durchführung unterschiedlicher Aufträge angewiesen.

Der bereits validierte Knoten befand sich an einer Büromauer unter indirekter Sonneneinstrahlung. Bild 7 zeigt die Einstrahlung während des Experiments im unteren Teil, die eingefangene Solarenergie im Oberen. In der letzten Stunde des Experiments trat ein Fehler auf, die Speicherspannung verblieb auf hohem Niveau, während die Eingangsleistung oszillierte.

Die rechte Seite des Plots zeigt eine Nahaufnahme um diesen Fehlerbereich. Gegen $t=5,97$ h und nach mehr als 3700 erfolgreichen Ausführungen überschreitet der Speicher einen Schwellwert, der Graph zeigt den Knoten in einem nichtdefinierten quasistatischen Zustand.

Unter näherer Inspektion ergab sich als Ursache ein seltener Timingfehler. Im Labor war dieser Fehler nicht zu identifizieren, da er auf die in der Zeit variierenden Arbeitspunkte von Quelle und Last zurückzuführen ist.

Fazit

In umgebungsanfälligen Systemen, die aus vielen Komponenten bestehen, ist die In-situ-Validierung unerlässlich. Solche Aufgabenstellungen fordern spezifische Messlösungen. Der RocketLogger zeigt ein erfolgreiches Beispiel für eine, aus »Maker«-Komponenten bestehende, spezifische Messlösung. (ct)

LITERATUR

Link zur Literaturliste auf design-elektronik.de:
<http://tinyurl.com/ya3gereb>