



Energie- und Leistungsmessung an Energy-Harvesting-Anwendungen

Mit Mikro-Energy-Harvestern können Funksensoren und Fernwirkgeräte ohne zusätzliche Energieversorgung, z.B. Batterien oder Netzanschluss, betrieben werden. Allerdings liefern solche Mikro-Generatoren nur wenig Leistung, so dass der Entwickler den Energiebedarf seines Systems besonders im Blick haben muss. Dabei helfen ihm Messgeräte, mit denen sich die dynamische Stromaufnahme von Low-Power-Schaltungen genau erfassen lässt.

Von Carlo Canziani und Wolfgang Gross

Heute sind Sensoren, wie Thermometer oder Brandmelder, meist über Kabel angeschlossen. In den intelligenten Häusern der Zukunft sollen eine Menge Sensoren für Feuchtigkeit, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Ozon, Feuer, Beleuchtung, Druck, Anwesenheit usw. für Komfort und Sicherheit der Bewohner sorgen. Eine kabelgebundene Installation ist hierbei ein großes Hindernis. In alten Häusern lassen sie sich vielleicht überhaupt nicht mehr nachrüsten, in neuen Häusern erfordert die Sensorinstallati-

on eine präzise Planung. Auf jeden Fall ist eine kabelgebundene Installation aufwendig und teuer. Sind die Sensoren einmal installiert, dann sind spätere Änderungen vielfach nicht mehr möglich. Kabel sind heute der Haupthinderungsgrund für eine großflächige Verbreitung von Sensoren.

Sensor-Aktor-Funknetzwerke

Mit Funksensoren und Funkaktoren sieht das besser aus: Bei ihnen wird die Information per Funk übertragen. Aber

woher bekommen diese Geräte ihren Strom? Zunächst mag man hierbei an Batterien denken. Das funktioniert ganz gut, aber alle ein, zwei Jahre muss die Batterie ausgetauscht werden. Sind nur vier oder fünf Sensoren im Haus verteilt und leicht zu erreichen, ist das noch kein Problem. Wenn viele Sensoren oder Geräte eingesetzt werden, etwa in großen Häusern oder bei gewerblicher bzw. industrieller Nutzung, wird der Batteriewechsel jedoch schnell kostenintensiv.

Strom aus der Umwelt

Man kann Funksensoren und Funksender aber auch aus der Umwelt mit Strom versorgen. Dazu gibt es mittlerweile eine ganze Reihe von Möglichkeiten, etwa Solarzellen, elektromagnetische Wandler, Piezo- oder Peltierelemente. Typischerweise besteht ein solcher Funksensor aus folgenden Baugruppen: Energiewandler, Energieverwaltung, dem eigentlichen Sensor, Mikrocontroller und Funksender.

Doch wie viel Strom braucht das System? – Zunächst gilt es, den Energiebedarf zu ermitteln und möglichst zu reduzieren. Die gängigste Methode zum

MESSEN + TESTEN

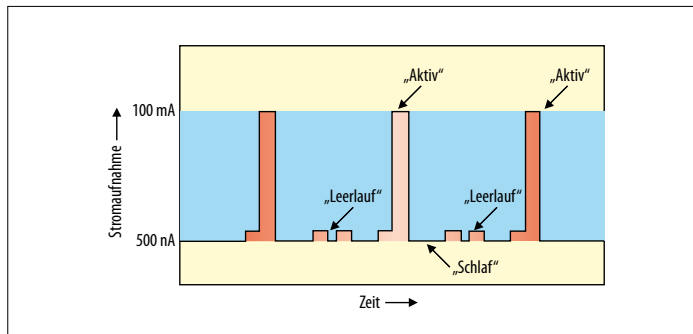


Bild 1. Die Stromaufnahme eines Funksensors ändert sich dynamisch je nach Betriebszustand. Nur kurze Zeit werden Daten gesendet (Aktivmodus) und Leistung aufgenommen. Die meiste Zeit ist der Sender inaktiv (Leerlauf) oder der Funksensor „schläft“ – Phasen mit sehr niedriger Stromaufnahme.

Energiesparen besteht darin, den Sender intermittierend arbeiten zu lassen. Den größten Teil der Zeit verbringt das System dann in einem Energiesparmodus. In Abständen wacht es auf, beginnt zu arbeiten und sendet seine Daten. Ein Fernthermometer könnte beispielsweise einmal pro Minute oder ferngesteuert auf Tastendruck aufwachen. In dieser Betriebsart aktiviert der Mikrocontroller den Sensor in Intervallen, führt eine Messung durch, verpackt die Messdaten zu einem Datentelegramm und sendet es. Danach fällt das Gerät wieder in den Schlafmodus. Übliche Stromaufnahme werte in solchen Energiespar-Betriebsarten liegen in der Größenordnung von einigen hundert nA oder wenigen μA . Die Funkübertragung erfolgt in Form eines kurzen Bursts, meist in einem der ISM-Frequenzbänder. Der Sender braucht nur wenige Volt Betriebsspannung, aber normalerweise 10 mA bis 100 mA Strom.

Solche Schaltungen haben also meist drei Betriebszustände: Schlafen, Normalbetrieb und Senden. Um den Energiebedarf zu quantifizieren, gilt es, die Leistungsaufnahme in jeder dieser Betriebsarten zu kennen und dazu die Zeit, die sich die Schaltung in der jeweiligen Betriebsart befindet. Typischerweise gelten folgende Zustände:

- Schlafen: In dieser Betriebsart braucht die Schaltung am wenigsten Strom. Weil sie sich den größten Teil der Zeit in dieser Betriebsart befindet, muss die Stromaufnahme so gering wie nur irgend möglich sein.
- Normalbetrieb: Der Mikrocontroller erfasst aktiv Daten vom Sensor, verarbeitet

die Sensordaten und schickt Daten zum Sender. Um Energie zu sparen, muss sichergestellt werden, dass sich der Mikrocontroller möglichst kurz in dieser Betriebsart befindet und danach schnell wieder schläft. Der Strombedarf in der aktiven Phase liegt um den Faktor 100 bis 1.000 über dem Strombedarf im Tiefschlaf. Ein häufiger Grund für zu hohe Energieaufnahme eines Funksensors liegt darin, dass die Steuer-Software die gesamte Schaltung zu lange aktiv hält.

→ Senden: Nach der eigentlichen Messung und der Verarbeitung der Messdaten werden diese gesendet. Für den Betrieb des Senders – und manchmal eines Leistungsverstärkers – wird der höchste Strom benötigt, typischerweise 10 mA bis 100 mA. Aus diesem Grund ist es wichtig, diese Zeit auf ein Minimum zu beschränken und jeden unnötigen Energieverlust zu vermeiden. Die Stromaufnahme beim Senden ist um den Faktor eine Million höher als im Schlafmodus.

Bezüglich der Stromaufnahme spielt die richtige Kommunikationsstrategie eine entscheidende Rolle. Gegenüber Standardprotokollen sind proprietäre Kommunikationsprotokolle oft effizien-

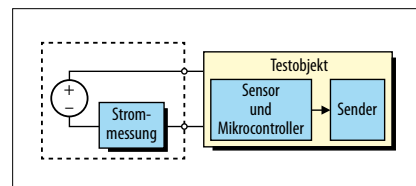


Bild 2. Der prinzipielle Messaufbau zur Energiemessung an einem Funksender.



Bild 3. Die gemessenen Zeitverläufe für Spannung (oben), Stromstärke (Mitte) und Leistung (unten).

ter, denn sie arbeiten mit kurzen Meldungen und somit kurzen Sendezeiten. Die Datenpakete von Standardprotokollen, die für eine Vielzahl von Anwendungen entwickelt wurden, sind durch den vorgegebenen Datenrahmen in aller Regel länger.

Daraus ergeben sich folgende Anforderungen an die Strommessung (Bild 1):

- Strommessbereich von einigen hundert nA bis 100 mA.
- Zeitauflösung von 100 µs bis in den ms-Bereich für die Ruhe- und Sendephasen.
- Darstellung der Leistung in W, der Energieaufnahme in Wh oder bei Einzelmessungen besser in J (Ws).
- Darstellung der zeitlichen Korrelation von Spannung, Stromstärke und Leistung.
- Triggerung auf bestimmte Ereignisse.
- Sicherer Betrieb des Testobjekts durch Einhaltung von Strom- und Spannungsgrenzwerten.

Am häufigsten wird für solche Messungen ein Oszilloskop in Verbindung mit einer Strommesszange verwendet. Hiermit lassen sich die Stromspitzen von einigen zig mA erfassen und auch das Timing dazu. Wenn die Messwerte sehr nah an die Minimalempfindlichkeit des Tastkopfes herankommen, ist es häufig zu nullen, damit die Messwerte reproduzierbar sind. Eine weitere Einschränkung ist die Vertikalauflösung des Oszilloskops. Das ist zugleich auch die größte Einschränkung: Was unterhalb des mA-Niveaus passiert, ist auf dem Oszilloskopschirm nicht zu sehen.

Dies ist umso ärgerlicher, da sich die Schaltung den größten Teil der Zeit in einem Modus niedriger Stromaufnahme befindet.

Als Alternative zu Strommesszangen werden häufig Strommesswiderstände zusammen mit Operationsverstärkern eingesetzt. In diesem Fall reduziert allerdings die Spannung über dem Messwiderstand die Versorgungsspannung am Testobjekt. Wenn sich die Versorgungsspannung ohnehin am unteren Rand des Betriebsbereichs befindet, kann diese zusätzliche Spannungsreduktion zur Fehlfunktion führen. Außerdem verhindern Offsetspannung und Verstärkungsfehler, dass die erforderliche Genauigkeit im Messbereich von 100 nA bis 100 mA erreicht wird, einem Verhältnis von immerhin eins zu einer Million.

Natürlich könnten die Ströme mit einer modifizierten Firmware des Testobjekts, die die Betriebsart fest vorgibt, gemessen werden. Das würde allerdings bedeuten, dass später der fertige Sensor-knoten mit einer anderen Firmware arbeiten würde als die getestete Schaltung. Somit könnten beispielsweise Fehler, die den Sensor-knoten länger aktiv halten als nötig, nicht entdeckt werden – was zu ei-

nem höheren Energiebedarf führen würde als erwartet.

Für ein valides Ergebnis muss simultan sowohl die Hardware als auch die sie steuernde Software getestet werden. Eine letztlich niedrige Stromaufnahme ist das Ergebnis der Optimierung beider Bereiche.

Messkonzept mit hoher Dynamik

Um mit höherer Auflösung zu messen, hat Agilent in seinen zwei neuen Zwei-Quadranten-Strom-/Spannungsquellen mit Messeinheiten (Source Measure Units, SMU) N6781A und N6782A eine automatische Messbereichumschaltung integriert. Die patentierte „Seamless Ranging“-Technik erkennt automatisch den geeigneten Messbereich und schaltet auch sofort und ohne Unterbrechung in diesen um. Damit ist eine bisher unerreichte Vertikalauflösung möglich – 28 bit mit einer Zeitauflösung von 5 µs –, die es erlaubt, die dynamische Stromaufnahme eines Funk-sensorknotens mit der erforderlichen hohen Genauigkeit zu messen. In Verbindung mit dem DC-Leistungs-analysator N6705B und der Steuer-/Analyse-Software 14585A ermöglicht die N6781A die Erfassung von Strom, Spannung und Leistung in einer Oszilloskop-Darstellung. Auf den aufgezeichneten Spuren lassen sich grafische Marker positionieren, mit deren Hilfe viele Werte einschließlich der Energie (Wh oder J) über definierte Zeitfenster betrachtet werden können. Ist erst einmal ermittelt, wieviel Leistung eine Schaltung braucht, kann im nächsten Schritt eine passende Energiequelle konstruiert werden.

MESSEN + TESTEN



Bild 4. Der Energy Harvester wird an eine elektronische Last angeschlossen, um seine Leistung zu messen. Anhand von Markern auf der Leistungskurve lässt sich die abgegebene Energie messen – hier in μJ .

Energy Harvesting in einem Funk-Lichtschalter

Drückt man auf den Funk-Lichtschalter, so betätigt die Schaltwippe einen elektromagnetischen Stromerzeuger. Der Lichtschalter kann somit völlig frei an der Wand positioniert werden, auch dort, wo das Verlegen von Kabeln nicht möglich oder aufwendig wäre.

Aus der Funktion des Funk-Lichtschalters ergeben sich folgende Probleme beim Messen:

- Energie wird erst bei physikalischer Bewegung erzeugt.
- Die Schaltung braucht ihre Spitzenleistung ab Beginn des Tastendrucks bis zum Ende der Sendephase.
- Der Funk-Lichtschalter muss so viel Energie speichern, dass er über diese Zeit hinweg betrieben werden kann. Nur wenige Millisekunden dauert

der ganze Sendevorgang. Der Funk-Lichtschalter arbeitet nur, wenn Energie zur Verfügung steht; einen Schlafmodus gibt es nicht. Eine spezielle Herausforderung liegt darin, dass der Lichtschalter in kurzer Zeit betriebsbereit sein muss.

Wieviel Energie wird benötigt?

Die Messung der vom Funk-Lichtschalter benötigten Energie ist mit den SMUs N6781A und N6715B von Agilent ganz einfach. Beide Messgeräte sind Stromquellen. Ihr arbiträrer Signalgenerator erzeugt einen Spannungspuls, der das Testobjekt aktiviert. Für die Messung des in die Schaltung fließenden Stromes schaltet die nahtlose Messbereichswahl in den Messbereich, mit dem die genaueste Strommessung möglich ist.

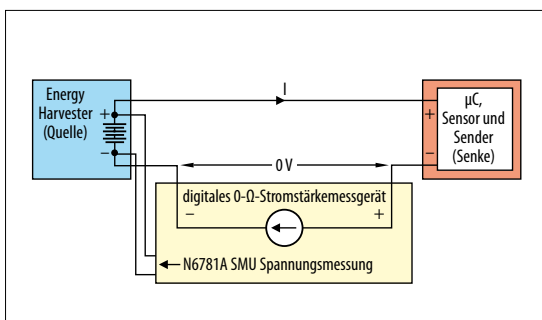


Bild 5. Mit dem N6781A lässt sich die Stromaufnahme messen, ohne die Spannung an den Anschlussklemmen der Last zu reduzieren.

80 μJ (Bild 2, 3). Soviel Energie muss der Energy Harvester also mindestens bereitstellen.

Wenn der am besten passende Energy Harvester seine Energie in einem schmalen Einzelimpuls liefert, muss die Energie zwischengespeichert werden, z.B. in einem Kondensator. Um die korrekte Funktion des Energy Harvester zu verifizieren und um zu prüfen, ob er den Anforderungen entspricht, wird der Energy Harvester mit Beschaltung (Gleichrichter und Kondensator) an die SMU angeschlossen. Die SMU arbeitet in diesem Fall als elektronische Last und wird so konfiguriert, einen konstanten Laststrom aufzunehmen (Konstantstromsenke). Für den als Beispiel gewählten Funkschalter wird ein Laststrom von 20 mA eingestellt. Die Messung wird von einer ansteigenden Flanke getriggert und die Messwerte im „Single Shot“-Modus erfasst (Bild 4).

Test des ganzen Energy-Harvesting-Systems

Ist sowohl der passende Funksender als auch der passende Energy Harvester ausgewählt, kann im nächsten Schritt alles zusammengeschaltet und die Funktion geprüft werden. Zur Quantifizierung der Leistung werden nun Strom- und Spannungsmessungen benötigt. Die Spannungsmessung ist einfach. Die Messung des geringen, dynamischen Stroms hingegen ist nicht trivial. Dazu könnte z.B. ein Messwiderstand in den Strompfad eingesetzt werden, aber die Spannung über dem Messwiderstand reduziert die Versorgungsspannung des Testobjekts und könnte dessen Funktion beeinträchtigen. Im schlimmsten Fall, wenn die Spannung hinter dem Messwiderstand unter die minimal erforderliche Betriebsspannung fällt, funktioniert es überhaupt nicht mehr.

Werden die Marker auf dem oszilloskop-ähnlichen Bildschirm der SMU entsprechend positioniert und steht die Software des 14585A auf „Energie-messung“, so kann direkt abgelesen werden, wieviele μJ Energie von der Aktivierung bis zum Senden des Datentelegrams benötigt werden. Der Funk-Lichtschalter braucht etwa

Die SMU N6781A von Agilent kann als Strommessgerät arbeiten und weist dabei zwischen ihren Anschlussklemmen eine Spannungsdifferenz von 0 V auf (Bild 5). Auf diese Weise können Ströme mit großem Dynamikbereich gemessen und wie auf einem Oszilloskop oder einem Datenlogger angezeigt werden. Die Spannung misst ein im SMU eingebautes, zusätzliches Digitalvoltmeter. Strom- und Spannungskurven werden synchron erfasst und auf dem gleichen Bildschirm als „V“ und „I“



Bild 6. Der Arbiträrsignalgenerator in der SMU N6781A kann zur Simulation eines Energy Harvester eingesetzt werden – hier z.B., um die Spannungsimpulse eines manuell betätigten elektrodynamischen Wandlers zu erzeugen.

angezeigt. Auch eine Leistungskurve kann dargestellt werden. Mittels Markern lässt sich Anfang und Ende eines Zyklus kennzeichnen, um die in diesem Abschnitt benötigte Energie zu bestimmen.

Die Energie für den Betrieb des Funksenders im als Beispiel gewählten Funk-Lichtschalter stammt aus der mechanischen Bewegung eines elektromagnetischen Wandlers. Bei der Betätigung des Schalters handelt es sich somit um ein einmaliges Ereignis. Als Trigger-signal für die Messung mit dem Gleichstrom-Leistungsanalysator N6705B dient die ansteigende Spannungsflanke. Der Triggerausgang liefert ein Signal, das andere Messungen triggern kann, etwa ein Oszilloskop oder einen Spektrumanalysator.

Mikrocontroller und Funksender für sicheren Betrieb optimieren

Der Einsatz eines mechanischen Energy Harvester ist während der Entwick-

lung der Schaltung nicht besonders praktisch, weil man ihn für jede Messung mechanisch betätigen muss. Für die Arbeit im Labor ist daher eine zuverlässige Quelle für gepulste Ströme, also ein „Energy-Harvester-Simulator“, sehr hilfreich und sinnvoll. Diese Funktion kann der Arbiträrsignalgenerator in der SMU N6781A erfüllen, indem er die zuvor beschriebenen Spannungsformen generiert (**Bild 6**). Auf diese Weise können am Messplatz reproduzierbare Energieimpulse erzeugt und auch verändert werden, z.B. um die Grenzen des Betriebsbereichs auszuloten. So kann sich der Entwickler voll auf seine Schaltung konzentrieren und muss zwischendurch nicht dauernd auf den Schalter drücken, um den elektrodynamischen Wandler zu betätigen.

hs



Carlo Canziani

erhielt sein Diplom in Nachrichtentechnik im Jahr 1983. 1985 begann er bei Hewlett Packard (heute: Agilent Technologies) in der Kundenbetreuung im Bereich Messtechnik für akkreditierte HF-/Mikrowellen-Labore.

1999 wechselte er in die Vertriebsabteilung und dann im Jahr 2009 ins Marketing. Dort ist Carlo Canziani für die Region Europa, Naher Osten und Afrika für spezielle Stromquellen verantwortlich.

carlo_canziani@agilent.com



Wolfgang Gross

studierte Elektrotechnik an der RWTH Aachen und war seit 1984 bei Hewlett Packard und seit Juni 2000 bei Agilent Technologies im Vertrieb für elektronische Messtechnik in verschiedenen Bereichen tätig. In

seiner jetzigen Funktion trägt er als Manager in der Region Europa, Naher Osten und Afrika die Verantwortung für Applikationsunterstützung sowie technischen Support und Schulung.

wolfgang_gross@agilent.com

elektroniknet.de