

## 2 Energy Harvester

Sowohl Energie aus der Umwelt als auch durch den Menschen erzeugte lässt sich nach einer geeigneten Umsetzung für unterschiedliche Anwendungen in der Mikroelektronik nutzen. Hierfür stehen diverse Energiewandler wie beispielsweise Solarzellen oder Thermogeneratoren zur Verfügung, die für sich allein genommen aber noch kein Energy-Harvesting-System ausmachen, auch wenn diese Energiewandler in diesem Zusammenhang oftmals als *Energy Harvester* bezeichnet werden. Auf die Frage, was ein EH-System eigentlich genau umfasst, wird es unterschiedliche Antworten geben.

Das primäre Ziel beim Energy Harvesting für die Mikroelektronik ist nicht in erster Linie, möglichst viel Energie zu ernten, sondern, dass eine bestimmte Anwendung mit der zur Verfügung stehenden Energie effektiv betrieben werden kann. Deshalb ist für die Entwicklung autark arbeitender Systeme bereits bei der Konzeption ein Umdenken weg von den bisher üblichen Methoden notwendig, und eine isolierte Betrachtung einzelner Komponenten verbietet sich hier.

Alle beteiligten Komponenten – wozu auch die Software zu rechnen ist – müssen bezüglich ihres Leistungsverbrauchs und ihrer Konfigurationsmöglichkeiten genauestens analysiert und mit dem möglichen Harvester plus Energiespeicher sowie dem genauen Einsatzzweck in Einklang gebracht werden. Deshalb ist ein ganzheitlicher Ansatz, am besten mit der Aufstellung einer konkreten Energiebilanz, für die Realisierung von Energy-Harvesting-Systemen notwendig.

### 2.1 Quellen und Systemaufbau

Ausschlaggebend für die Wahl eines geeigneten Harvesting-Prinzips ist in erster Linie die Umgebung, in der das System arbeiten soll. Die verschiedenen Energiequellen wie Licht, Vibration oder Temperatur müssen im entsprechenden Umfeld in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen.

Die Tabelle 2.1 zeigt als Überblick, was ungefähr von den verschiedenen Quellen an Leistung oder auch an Leistungsdichte zu erwarten ist. Die Leistung wird hier wie üblich in Watt ( $W$ :  $1 W = 1 J/s$ ) beziehungsweise in den kleineren Untereinheiten angegeben. Genaugenommen ist der Begriff *Leistungsdichte* zwar nicht eindeutig und physikalisch korrekt, hier wird er jedoch einfach auf eine Fläche oder auf ein Volumen bezogen.

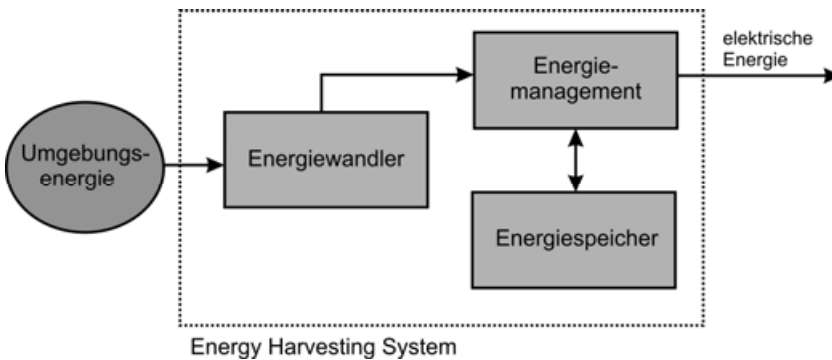
Produziert ein Harvester innerhalb eines bestimmten Zeitraums mehr Energie, als die Anwendung verbraucht, fällt die Energiebilanz positiv aus. Bei einer negativen Energiebilanz ist kein autonomer Betrieb möglich, so dass der Harvester entweder mehr Energie produzieren oder aber die Elektronik weniger Energie verbrauchen muss. Diesem einfachen Sachverhalt ist aus Effektivitätsgründen entsprechend zu begegnen. Deshalb wird

die im Bild 1.5 als *einfachste Form des Energy Harvesting* bezeichnete Schaltung erweitert. Zumindest ist noch ein Energiespeicher notwendig, der typischerweise aus einem Akkumulator oder auch nur aus einem Kondensator besteht. Näheres hierzu findet sich im dritten Kapitel.

**Tabelle 2.1:** Leistung von Energy-Harvesting-Quellen

Quelle	Technologie	Leistung	Anmerkung/Anwendung
Licht	Solarzelle	100 mW/cm <sup>2</sup> 100 μW/cm <sup>2</sup>	direktes Sonnenlicht Kunstlicht
Temperatur	Thermogenerator	60 μW/cm <sup>2</sup> 710 μW/cm <sup>2</sup>	Standard Micropelt, bei 3 K-Temperaturdifferenz
Schaltvorgang	Elektrodynamisch	50 μJ/N	50 μW EnOcean PTM 200
Vibration	Piezo	4 μW/cm <sup>3</sup> 800 μW/cm <sup>2</sup>	menschlich im Hz-Bereich maschinell im kHz-Bereich
Luftstrom	Strömungswandler	1 mW/cm <sup>2</sup>	Mikropumpe mit 30 l/min
HF-Strahlung	Antenne	< 1 μW/cm <sup>2</sup>	im Nahfeld
Akustik (100 dB)	Piezo	950 nW/cm <sup>3</sup>	kaum erforscht
Dynamo	Elektrodynamisch	3 W - 7 W	Fahrraddynamo, Taschenlampe mit Dynamo

Wie mit der Energie zu verfahren ist, bestimmt ein Energiemanagement. Die aus der Umgebung gewonnene Energie ist in nutzbare elektrische Energie umzusetzen und zu speichern, damit sie in den Zeiten hoher Ausbeute für die Zeit geringer Ausbeute vorgehalten werden kann, um die Elektronik entsprechend der Anwendung möglichst ausfallsicher versorgen zu können.



**Bild 2.1:** Zwischen dem Energiewandler und dem Energiespeicher sorgt das Energiemanagement für die entsprechende Umsetzung und Verteilung der gewonnenen Energie.

Das Energiemanagement kann im einfachsten Fall nur aus einer kleinen Schaltung bestehen, die mit Dioden (Schottky) und Transistoren (MOSFET) realisiert wird, was in den Abschnitten 3.7.2 und 7.3.5 genauer behandelt wird. Hier nur so viel: Es werden mit der Schaltung zwei Schwellen festgelegt, eine für einen Kurzzeitspeicher, der laufend vom Harvester gespeist wird, und eine für einen Langzeitspeicher, der die „überschüssige“ Energie sammelt und dann bereitstellt, wenn relativ viel Strom benötigt wird, wie es etwa während eines Sendevorgangs bei einem drahtlosen Sensorknoten der Fall ist.

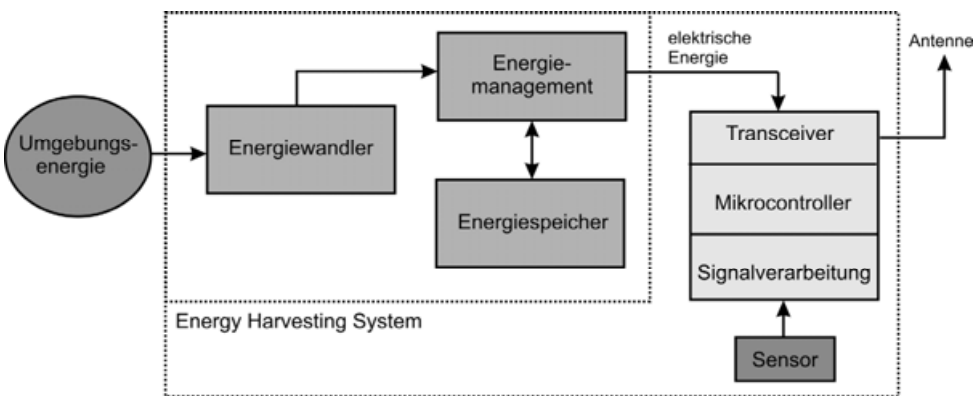
In den meisten Fällen ist außer dem Energiewandler – als Bestandteil des Energiemanagements – noch eine Spannungsumsetzung notwendig, was somit zu Spannungswandlern und Ladeschaltungen führt. Außerdem können spezielle EH-Module den Aufbau des Energiespeichers und des Energiemanagements maßgeblich vereinfachen, was in den entsprechenden Abschnitten im Kapitel 3 zu lesen ist.

Es wurde erwähnt, dass das Energiemanagement bestimmt, wie mit der Energie umgegangen wird. Bei einem Sensorknoten sind dabei in erster Linie die Mess- und Sendezyklen von Bedeutung, die unterschiedlich viel Strom verbrauchen. Damit ist man automatisch bei der Anwendung angelangt, die letztendlich dafür verantwortlich ist, wie oft gemessen und gesendet werden muss, damit sie ihre vorgesehene Aufgabe erfüllen kann.

### 2.1.1 Elektronik und Funktechnik

Das Kernstück einer per Energy Harvesting versorgten Elektronik – eines drahtlosen Sensorknotens – bildet meist ein Mikrocontroller, der die Signalaufnahme und Datenübertragung möglichst „intelligent“ steuert. Was das genau bedeutet, ist eben sehr stark von der jeweiligen Anwendung abhängig, also wie viele, wie genau und wie oft Messdaten erfasst werden müssen.

Die gebräuchliche Betriebsart eines drahtlosen Sensorknotens ist nicht der Dauerbetrieb, sondern ein Schlafmodus. Ein geeigneter Mikrocontroller sollte deshalb über effiziente Sleep-Modi verfügen.



**Bild 2.2:** Komponenten eines Energy Harvesting Systems, wobei die Anwendung und die Software ebenfalls dazuzurechnen sind.

Neben einer Elektronik, die möglichst wenig Strom für die Datenaufnahme – per Sensor – und die Signalaufbereitung verbraucht, ist eine energieeffiziente Funktechnologie zwingend erforderlich. Der Mikrocontroller ist ebenfalls für die Steuerung des hierfür benötigten Transceivers notwendig und entscheidet, in welchen Situationen Daten gesendet werden müssen.

In der Schaltung sollten zudem möglichst viele Komponenten, wie die Sensoren und die Signalverarbeitung, abschaltbar sein. Je nach Anwendung sind unterschiedliche Mess- und Sendezyklen notwendig, wobei grundsätzlich in eine Zeit- und in eine Ereignisgesteuerte Funktion für das Einschalten der Aktivphase unterschieden werden kann. Dies

bedeutet, dass der Sensorknoten entweder automatisch in bestimmten Zeitintervallen aufwacht, um Messungen und Übertragungen durchzuführen, oder aber immer dann, wenn ein bestimmter Signalzustand auftritt. Dieser wird typischerweise als externer Interrupt, als Pegeländerung an einem I/O-Pin sowie beim Erreichen einer bestimmten Schwelle oder eines Wertes am A/D-Wandler-Eingang auftreten.

Obwohl viele Mikrocontroller über einen integrierten A/D-Wandler verfügen, können nur die wenigsten während des Schlafmodus das Eingehen von Daten überwachen (Monitoring) und das System entsprechend schnell wieder für das Messen und Übertragen aktivieren. Mitunter reicht die Auflösung des integrierten A/D-Wandlers auch nicht aus, und er verbraucht im Gegensatz zu anderen Einheiten eines Mikrocontrollers relativ viel Strom.

Per I/O-Port oder über eine serielle Schnittstelle wie SPI oder I<sup>2</sup>C sind separate Wandler oder *Digitale Sensoren*, die bereits die Signalverarbeitung im Chip beinhalten, an einen typischen Mikrocontroller anschließbar. Die Eigenschaften der Wandler und Digitalen Sensoren sind in Hinsicht auf ihre Sleep- und Monitoring-Funktionen bei der Schaltungsentwicklung genauestens zu analysieren. Entsprechendes gilt für den Transceiver, der für die „drahtlose Schnittstelle“ mit dem jeweiligen Modulationsverfahren und Zugriffsprotokoll zuständig ist.

Die benötigte Netzwerkfunktionalität, die mit dem Transceiver und dem Mikrocontroller im Sensorknoten zu implementieren ist, hat ebenfalls einen maßgeblichen Einfluss auf den Energieverbrauch. Die Topologie und das Netzwerkprotokoll sind deshalb mit Bedacht auszuwählen.

Einheiten gemäß Standards wie WLAN, Bluetooth, IEEE 802.15.4 oder ZigBee können eine gewünschte Interoperabilität bieten, was als ein signifikantes Merkmal für das Produkt ausgewiesen werden kann. Mit einfacheren Modulationsverfahren und „schlankeren“ Protokollen ergibt sich jedoch ein hohes Energieeinsparpotenzial, wie es etwa mit der EnOcean- oder auch SimpliciTI-Funktechnologie von Texas Instruments möglich ist. Durch die Beschränkung auf eine einfache Punkt-zu-Punkt-Strecke, bei der kein Routing und möglicherweise noch nicht einmal die Fähigkeit gefordert ist, dass der Sensorknoten auch Pakete empfangen kann, sind weitere drastische Einsparungen möglich.

Die Kombination eines Mikrocontrollers mit einem Transceiver hat die Firma EnOcean bereits mit ihren Modulen (STM300) vollzogen, Texas Instruments kombiniert einen MSP430 mit einem 868-MHz-Transceiver zum Typ CC430, und die Firma Atmel bietet den ATmega128RFA1 an, der einen IEEE 802.15.4-kompatiblen Transceiver (Bild 2.3) enthält. Diese Ein-Chip-Lösungen lassen sich einfacher (energieeffizienter) programmieren und damit auch leichter in eigene Energy-Harvesting-Schaltungen integrieren.

Bei drahtlosen Sensorknoten ist der Transceiver der größte Stromverbraucher, so dass hier der erste Ansatzpunkt für eine Überprüfung gegeben ist. Dabei ist von ausschlaggebender Bedeutung, wie oft überhaupt ein Sendevorgang für die jeweilige Anwendung notwendig ist. Entsprechendes gilt für die Messdatenerfassung mit den angeschlossenen Sensoren, die sich mit der Signalkonditionierung und der Umsetzung (per A/D-Wandler) meist als der zweithöchste Verbraucher darstellen. Eine Entkopplung von Mess- und Sendezyklus, die nur dann ausgeführt werden, wenn es die Anwendung erfordert, ist deshalb für Energy-Harvesting-Systeme systemimmanent.