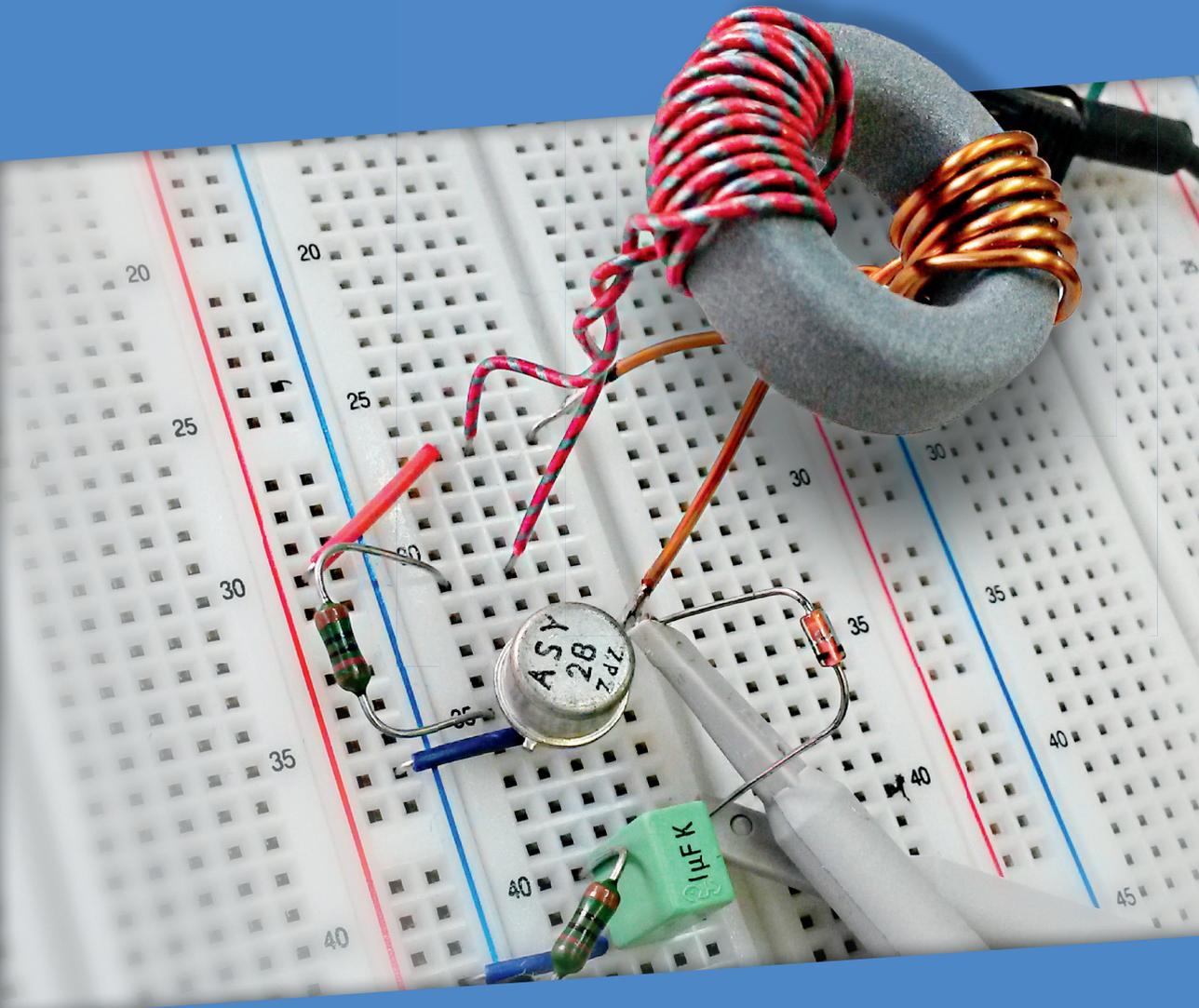


Stromversorgung ohne Stress – Band 3

Energy Harvesting

Elektronik ohne Batterien oder Versorgungsnetz



Franz Peter Zantis

Stromversorgung ohne Stress Band 3

Energy Harvesting

Elektronik ohne Batterien oder Versorgungsnetz



Franz Peter Zantis

© 2021: Elektor Verlag GmbH, Aachen

1. Auflage 2021

ISBN 978-3-89576-454-7

978-3-89576-455-4 (E-book)

- Alle Rechte vorbehalten.

Die in diesem Buch veröffentlichten Beiträge, insbesondere alle Aufsätze und Artikel sowie alle Entwürfe, Pläne, Zeichnungen und Illustrationen sind urheberrechtlich geschützt. Ihre auch auszugsweise Vervielfältigung und Verbreitung ist grundsätzlich nur mit vorheriger schriftlicher Zustimmung des Herausgebers gestattet.

Die Informationen im vorliegenden Buch werden ohne Rücksicht auf einen eventuellen Patentschutz veröffentlicht. Die in diesem Buch erwähnten Soft- und Hardwarebezeichnungen können auch dann eingetragene Warenzeichen sein, wenn darauf nicht besonders hingewiesen wird. Sie gehören dem jeweiligen Warenzeicheninhaber und unterliegen gesetzlichen Bestimmungen.

Bei der Zusammenstellung von Texten und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag, Herausgeber und Autor können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Für die Mitteilung eventueller Fehler sind Verlag und Autor dankbar.

Umschlaggestaltung: Elektor, Aachen

Satz und Aufmachung: Eric Bogers, Saarbrücken

Druck: Ipskamp Printing, Niederlande

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
1 • Energy Harvesting	9
1.1 • Energie	9
1.1.1 • Energiearten und Umwandlung	10
1.1.1.1 • Energie-Formeln, Umrechnungshilfe und Größenordnungen	11
1.1.2 • Energiebedarf	13
1.2 • Besonderheiten der Energiequellen	15
1.3 • Aufbereitung	16
1.3.1 • Energie wandeln	17
1.3.1.1 • Gleichspannung aufbereiten	17
1.3.1.2 • Wechselspannung aufbereiten	20
1.3.2 • Energie speichern	25
1.3.2.1 • Kondensatoren und Akkumulatoren als Energiespeicher	27
1.3.2.2 Mechanisch Energie speichern	30
1.3.3 • Energiemanagement	32
1.3.3.1 • Minimalsystem	33
2 • Energie gewinnen aus Licht	37
2.1 • Solarzellen	39
2.2 • Energie aus Licht im Außenbereich	42
2.3 • Energie aus Licht im Innenbereich	44
2.4 • Lichtenergie sammeln	47
2.4.1 • Spannungskomparator	47
2.4.2 • Die Gesamtschaltung	49
2.4.3 • Das Programm des Mikrocontrollers	54
2.4.4 • Energiebetrachtungen	57
2.5 • Versorgen eines Temperatur-Außenfühlers durch Solarzellen	59
2.5.1 • Sperrwandler mit Übertrager	59
2.5.1.1 • Anmerkungen zu Übertragern in Sperrwandlern	67
2.5.2 Energiebetrachtungen	71
3 • Energie aus elektromagnetischen Wellen	73
3.1 • Ein persönliches Abenteuer	73
3.2 • Elektromagnetische Wellen	75
3.2.1 • Energie aus dem Fernfeld	76
3.2.1.1 • Abstimmung mit einem Schwingkreis hoher Güte	78
3.2.1.2 Quarzfrequenz ziehen	81
3.2.1.3 • Auswahl der Dioden	82
3.2.1.4 • Energie aus Mittelwellen	83
3.2.1.5 • Intermezzo: Transistoren als Dioden	84
3.2.1.6 • Kernmaterial aus Eisenpulver oder Ferriten	85
3.2.1.7 • Energie aus UHF-Wellen	87

3.2.2 • Energie aus dem Nahfeld	92
3.2.2.1 • Spannungserhöhung durch Resonanzkreis	96
3.3 • „Low-Drop-Komparator“	102
4 • Thermoelektrizität	107
4.1 • Peltier-Effekt, Seebeck-Effekt	108
4.2 • Thermoelement als elektrischer Generator	108
4.2.1 • Thermisches Modell	111
4.2.2 Ausgangsspannung und Ausgangsleistung	113
4.3 • Energie aus dem Bienenstock	115
4.3.1 • Energy-Harvesting-Chip LTC3108	117
4.3.2 Sperrwandler mit Germanium-Transistor.	123
4.4 • Thermoelement-Array	125
4.4.1 Leselicht am Holzofen.	126
4.4.1.1 Hochsetzsteller statt Sperrwandler.	130
4.4.3 • Modellbau-Antriebe	132
4.4.2 • Ofen-Propeller.	133
4.5 • Anwendung mit Mikrocontroller.	134
4.5.1 • Der sparsame Mikrocontroller	136
4.5.1.1 • Startup und Brown-Out-Reset.	137
4.5.1.2 • Low-Power-Mode	139
5 • Energie aus mechanischer Bewegung (Kinetik)	145
5.1 • Windenergie	146
5.1.1 • Windenergie direkt nutzen	147
5.1.1.1 • Auswahl des Generators	149
5.1.1.2 • Energie aus der Röhre	149
5.1.1.3 • Monitoring	151
5.1.2 • Windpendel	152
5.2 • Energie aus Vibration	153
5.2.1 Piezo-Experimente	156
5.2.2 Vervielfacher	159
5.2.3 • Spezial-IC LTC3588	161
5.2.4 • Anwendungen	164
5.3 • Energie aus Druck-Betätigung	164
5.4 Energie aus Schall	165
6 • Energie aus chemischer Reaktion	171
6.1 • Halbzellen	172
6.2 • Redoxreihe	173
6.3 • Obstbatterie	175
6.4 • Bodenbatterie	176
6.5 • DC-DC-Konverter	177

Anhang	181
Bibliographie	181
Formelzeichen	183
Konstanten	184
Index	185

Vorwort

Nachdem der Band 1 der Reihe „Stromversorgung ohne Stress“ die Grundlagen der Stromversorgungstechnik für elektronische Geräte enthält und Band 2 einige Applikationen, geht es hier im dritten Band nun um ein spezielles, aber sehr aktuelles Thema. Für den Betrieb moderner elektronischer Bauteile ist vergleichsweise nur noch wenig Energie notwendig. Dies eröffnet neue Möglichkeiten: Schaltungen und Baugruppen die ohne Batterien oder Akkumulatoren auskommen und auch keinen Anschluss an das Versorgungsnetz benötigen. Damit entfällt auch ein großer Teil des Wartungsaufwandes. Die Baugruppen arbeiten weitestgehend „für sich alleine“. Die Energie wird auf unterschiedlichste Weise aus der Umgebung gewonnen. Dazu sind allerdings spezielle Techniken erforderlich. Nicht nur zur Gewinnung der Energie – auch zur Umformung, so dass sie für elektronische Schaltungen nutzbar ist.

In diesem Buch geht es um die Bereitstellung kleiner Energiemengen, mit denen kleine Geräte (Sensoren, Sender und Empfänger für QRP oder Datenübertragung, etc.) völlig autark betrieben werden können. Weiterhin habe ich mir zum Ziel gesetzt, wenn möglich, mit Bauteilen aus der Bastelkiste auszukommen. Hochkomplexe, spezialisierte Integrierte Schaltungen sind schwer zu bekommen, teuer und oft nach kurzer Zeit nicht mehr lieferbar. Mein Bestreben ist es, den am Thema interessierten Elektroniker zu unterstützen, eigene Energy-Harvesting-Projekte mit Teilen aus der Bastelkiste umzusetzen. Ausnahmen bestätigen aber die Regel und gerade beim Energy-Harvesting ist es nicht immer möglich auf Spezial-ICs zu verzichten. Es geht eben um jedes μW und es ist leicht nachvollziehbar, dass es einfacher ist auf einer kleinen Chipfläche mit wenig Energie zu arbeiten als bei einer ausladenden Schaltung mit umfangreicher Verdrahtung.

Dann wollte ich nicht einen langatmigen Theorieteil am Anfang bringen. Ich weiß, dass meine Leser „Macher“ sind. Sie möchten reale Projekte umsetzen ohne vorher überviel Zeit für lange theoretische Abhandlungen aufzubringen. Deshalb habe ich die mehr „theoretischen“ oder grundsätzlichen Themen in die einzelnen Kapitel und Projekte eingestreut. Einen vollständigen Überblick erhält man deshalb erst, wenn man das Buch in Gänze gelesen hat. Dafür kann der Leser bereits im 2. Kapitel ein erstes Projekt umsetzen.

*Franz Peter Zantis, DB7FP
Im Herbst 2020*

1 • Energy Harvesting

Der Zweck vieler elektronischer Schaltungen ist die Erfassung physikalischer Größen, das Senden von Nachrichten oder das Empfangen und verarbeiten von Information. Häufig wird dazu nur wenig Energie benötigt, denn die Bauteile sind heute hochintegrierte, winzige Chips.

Dies hat zu einem Trend geführt, bei dem man versucht die notwendige Energie nicht mehr aus Batterien oder Stromversorgungsgeräten zu generieren, sondern direkt aus der Umwelt. Man kann zum Beispiel mit Hilfe von Licht, Temperaturunterschieden, Luftströmungen, elektromagnetischen Wellen oder Bewegung quasi nebenher kleine Mengen Energie gewinnen.

Dabei ergeben sich viele Vorteile. Das Austauschen von Batterien entfällt vollständig und damit auch deren aufwändige Entsorgung. Ein Anschluss an das Energieversorgungsnetz ist nicht mehr notwendig. Eine Verbindung zur Außenwelt ist dann oft nur noch über einen Nachrichtenkanal erforderlich. Handelt es sich dabei um eine Funkverbindung, dann können die Module weitgehend frei platziert werden. Einschränkungen durch Kabelverbindungen entfallen jedenfalls.

Weltweit werden viele Millionen Module betrieben, die mit Umweltenergie arbeiten könnten. Setzt man das Konzept „Energy Harvesting“ (deutsch: Energie-Ernten) konsequent um, dann ist anzunehmen, dass sich in der Gesamtheit auch eine durchaus nennenswerte Energieeinsparung und Müllvermeidung ergibt.

Thema in diesem Buch sind aber ausschließlich Energy-Harvesting-Projekte, die ganz konkret für jeden Elektroniker oder Funkamateurliebhaber mit Standardausrüstung und Standardbauteilen machbar sind.

1.1 • Energie

Zur Abschätzung, ob eine Baugruppe oder Schaltung generell mit Hilfe von „Energy Harvesting“ versorgt werden kann, braucht man Kenntnisse über die physikalische Größe „Energie“ selbst.

Energie ist eine fundamentale physikalische Größe. Möchte man irgend etwas verändern, dann braucht man dafür Energie. Sie ist Voraussetzung dafür, dass sich „etwas tut“. Das Formelzeichen für Energie ist E oder W (für engl. ‚work‘). Die SI-Einheit (SI = *Système international d’unités* = *internationales Einheitensystem*) ist Joule mit dem Kürzel J. Ein Joule entspricht einer Wattsekunde (Ws). Man kann umrechnen:

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} = 1 \text{ Nm} \quad (1.1)$$

J = Joule (Energie)

kg = 1000 Gramm (Masse)

W = Watt (Leistung)

m = Meter (Länge)

s = Sekunde (Zeit)

N = Newton (Kraft)

Für den Energieumsatz bei Mensch und Tier verwendet man in der Praxis allerdings nach wie vor die Kalorie (cal). Dabei handelt es sich um eine veraltete Maßeinheit. Sie gehört nicht zu den SI-Einheiten. Es gilt die Umrechnung:

$$1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J} \quad (1.2)$$

1.1.1 • Energiearten und Umwandlung

Energien kommen in verschiedenen Arten vor, die man als „Energiearten“ bezeichnet. Die bekanntesten Energiearten sind elektrische, mechanische, thermische und chemische Energie. Zur Vereinfachung teile ich die Energie mal in vier Arten ein:

- **Thermische Energie (Wärmeenergie)**

Dabei handelt es sich um die ungerichtete Bewegung der Moleküle bzw. Atome eines Stoffes.

- **Mechanische Energie** (kinetische Energie, potentielle Energie)

Kinetische Energie ist die Energie, die Körper innehaben, welche sich gerichtet bewegen. Beim Wind sind es die Luftmoleküle, die mit kinetischer Energie „aufgeladen“ sind. Schall ist auch kinetische Energie, denn Moleküle oder Atome bewegen sich gerichtet.

Körper, die sich in einem Kraftfeld befinden, enthalten potentielle Energie bzw. Lageenergie. Dazu gehören z.B. Körper, die vom Schwerefeld der Erde angezogen werden.

- **Elektrische Energie**

Bei der elektrischen Energie geht es um elektrische Ladungen, die getrennt sind - die sich aber ausgleichen möchten. Basis ist das Elektron (e^-) mit der Elementarladung $-Q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$.

- **Chemische Energie**

Bei der Umwandlung von Stoffen kann Energie freigesetzt werden. Bei der Oxidation bzw. Verbrennung (Verbindung mit Sauerstoff) wird meistens Energie frei (exotherme Reaktion).

Beim Menschen werden Fett- und Zuckermoleküle zerlegt und mit Hilfe von Sauerstoff zu CO_2 und Wasser umgewandelt. Dabei entsteht sowohl kinetische Energie (wir können uns bewegen) als auch Wärmeenergie (unser Körper hat eine Innentemperatur von konstant 37°C). Ein „Durchschnittsmensch“ mit einem Körpergewicht von 75 kg gibt während ruhigem Sitzen eine permanente Wärmeleistung von 120 W ab. Bei einer Oberfläche von ungefähr 2 m^2 sind das 6 mW pro cm^2 . Allerdings ist der Energieaustritt ungleich verteilt. Zumindest bei einem unbedeckten Menschen tritt am Bauch mehr Energie aus als an den Fingern.

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass Energie nur gewandelt, nicht aber vernichtet werden kann. In diesem Zusammenhang ist interessant, dass alle Energiearten unmittelbar in Wärmeenergie umgewandelt werden können. Die Thermische Energie ist die allerniedrigste Energieart. Letzten Endes endet jeder Vorgang der Energiewandlung final in Wärmeenergie.

Grundsätzlich gilt aber, dass jede Energie von einer Erscheinungsform in eine andere Form umgewandelt werden kann. Gemäß den physikalischen Gesetzmäßigkeiten bleibt bei jeder Umwandlung die gesamte Energie erhalten. Die Energie kann nicht „aus dem Nichts“ erzeugt werden. Deshalb treten bei Energie-Umwandlungsvorgängen auch immer andere Energieformen auf – sogenannte „Verluste“.

Wenn wir zum Beispiel Laufen, dann wird uns warm. Die uns zur Verfügung stehende Energie wird also in gewünschte mechanische Energie umgewandelt, mit der wir uns schnell fortbewegen, und in unerwünschter Wärmeenergie, die uns zum Schwitzen bringt.

Technisch werden diese Verluste durch den Wirkungsgrad η (eta) ausgedrückt. Man betrachtet die aufgewendete Energie und die Energie die in der gewünschten Form auftritt und setzt beide ins Verhältnis:

$$\eta = \frac{\text{gewünschte Energie}}{\text{aufgewandete Energie}} \quad (1.3)$$

1.1.1.1 • Energie-Formeln, Umrechnungshilfe und Größenordnungen

Auf der nächsten Seite nun eine Sammlung von Formeln für die Berechnung der Energie. Mit deren Hilfe kann man im speziellen Fall abschätzen, wie viel Energie geerntet werden könnte. An entsprechender Stelle im Buch komme ich auf diese Formeln zurück.

In der folgenden Umrechnungstabelle ist jeweils die links angegebene Einheit gleich der Zahl mal der oben angegebenen Einheit.

	Joule/Wattsek.	Kilowattstunde	Elektronenvolt	Kilopondmeter (veraltet)	Kalorie (veraltet)
1 kg·m ² /s ²	1	2,779·10 ⁻⁷	6,242·10 ¹⁸	0,102	0,239
1 kWh	3,6·10 ⁶	1	2,25·10 ²⁵	3,667·10 ⁵	8,60·10 ⁵
1 eV	1,602·10 ⁻¹⁹	4,45·10 ⁻²⁶	1	1,63·10 ⁻²⁰	3,83·10 ⁻²⁰
1 kp·m	9,80665	2,72·10 ⁻⁶	6,13·10 ¹⁹	1	2,34
1 cal	4,1868	1,163·10 ⁻⁶	2,611·10 ¹⁹	0,427	1

Einige wenige Anmerkungen zur Tabelle: Energie ist eine Größe, die auch im Alltag einen um viele Größenordnungen unterschiedlichen Wert annehmen kann. 1 J = 1 Ws = 1 Nm ist zum Beispiel die potentielle Energie, die beim Anheben einer Tafel Schokolade (100 g) um 1 Meter in dieser gespeichert wird.

Die Einheit Elektronenvolt (eV) wird unter anderem in der Festkörper-, Kern- und Elementarteilchenphysik verwendet. Ein Photon von violetterem Licht hat eine Energie von ca. 3 eV, eines von rotem Licht ca. 1,75 eV. Die Einführung dieser Einheit vereinfacht den Umgang mit den ansonsten winzigen Zahlen.

Kilopondmeter ist veraltet und wird seit 1978 offiziell nicht mehr verwendet. Aber man findet es noch in alten Büchern.

Spannenergie einer gespannten Feder	$E_{\text{pot}} = \frac{1}{2} \cdot D \cdot s^2$	D = Federkonstante in N/m s = Auslenkung der Feder aus der Ruhelage in m
Potenitielle Energie eines Körpers mit Masse m in einem homogenen Gravitationsfeld	$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$	m = Masse in kg g = Erdbeschleunigung von 9,81 m/s ² h = Höhe in welcher sich der Körper befindet in m
Kinetische Energie eines Körpers	$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$	m = Masse des Körpers in kg v = Bewegungsgeschwindigkeit des Körpers in m/s
Rotationsenergie eines Körpers	$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$	J = Trägheitsmoment um die Drehachse in kg · m ² ω = Winkelgeschwindigkeit in rad/s
Elektrische Energie in einem Stromkreis	$E_{\text{el:strom}} = U \cdot I \cdot t$	U = elektrische Spannung in V I = Strom durch die Leitung in A t = Zeitdauer in s
Energie eines geladenen Plattenkondensators	$E_{\text{Plattenkondensator}} = \frac{Q^2}{2 \cdot C} = \frac{C \cdot U^2}{2}$	Q = Ladung in As C = Kapazität des Kondensators in F U = elektrische Spannung in V
Magnetische Feldenergie einer stromdurchflossenen Spule	$E_{\text{Spule}} = \frac{L \cdot I^2}{2}$	L = Induktivität in H I = elektrische Strom in A
Relativistische Energie eines freien Teilchens	$E_{\text{relativistisch}} = \frac{m \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$	m = Masse des Teilchens v = Geschwindigkeit des Teilchens c = Lichtgeschwindigkeit = 299792458 m/s
Energie von Photonen (Lichtquanten)	$E_{\text{photon}} = h \cdot f$	h = plancksche Wirkungsquantum ≈6,63·10 ⁻³⁴ J·s f = Frequenz in Hz
Energie eines Erdbebens	$E_{\text{Erdbeben}} = 10^{\frac{3}{2}(M-2)}$	Die Einheit dieser Formel ist Tonnen TNT M = Magnitude auf der Richterskala
Energieänderung (Kraft längs eines Weges)	$W = \int F ds$	F = Kraft in N s = Wegstück in m
Energie in einem Zeitintervall	$W = \int_{t_0}^{t_1} P(t) dt$	t_0, t_1 = Zeitintervall in s P = Leistung in W

Die Einheit *Kalorie* wird nur noch im Zusammenhang mit Ernährung verwendet - und auch dort nur wegen der Tradition und Gewohnheit.

1.1.2 • Energiebedarf

Bevor überhaupt eine Energiequelle für die Versorgung einer Schaltung bzw. meines Gerätes in Betracht kommt

- ist es ratsam festzustellen, wie viel Energie die Schaltung überhaupt benötigt (im ungünstigsten Fall);
- muss die anvisierte Quelle daraufhin untersucht werden, ob sie überhaupt ausreichend Energie zur Verfügung stellen kann.

Ausreichend heißt hier: deutlich mehr als meine zu versorgende Schaltung benötigt. Denn immer muss die von der Quelle bereitgestellt Energie aufbereitet werden, damit sie meine Schaltung/mein Gerät versorgen kann. Diese Aufbereitung ist aber nie verlustfrei.

Zum Betrieb einer elektronischen Schaltung wird in jedem Fall elektrische Energie E benötigt. Diese ergibt sich aus der über die Zeit t zugeführten Leistung P . Es ist oft so, dass die benötigte Energie nicht konstant ist, sondern von bestimmten Betriebszuständen – und damit von der Zeit abhängt:

$$E = \int_{t_0}^{t_1} P(t) \cdot dt$$

t_0 = Zeit am Anfang des betrachteten Zeitraums

t_1 = Zeit am Ende des betrachteten Zeitraums

Vereinfacht kann man oft auch schreiben:

$$E = P \cdot t = U \cdot I \cdot t \quad (1.4)$$

E = Energie (hier elektrische Energie) in Joule

P = Leistung in Watt

t = Zeit in Sekunden (währenddessen sich P nicht ändert)

U = elektrische Spannung in Volt

I = elektrischer Strom in Ampere

...und unterschiedliche Energieaufnahmen im Zeitverlauf durch Fallunterscheidungen behandeln. Beim Energy-Harvesting sind typischerweise zwei Fallunterscheidungen notwen-

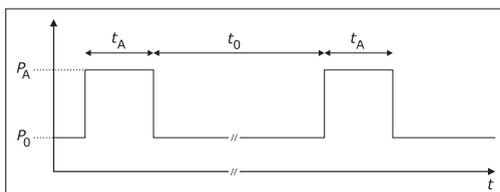


Bild 1.1 • Typisches Profil für die Leistungsaufnahme eines Verbrauchers beim Energy-Harvesting.

dig. Es gibt einen Grundverbrauch bzw. eine Grundleistung, die für die Überwachungsschaltung - oftmals permanent - notwendig ist, und es gibt Zeiten mit hohem Leistungsbedarf; nämlich dann, wenn der angeschlossene Verbraucher arbeiten soll.

Bei dem Leistungsprofil aus Bild 1.1 gibt es nur zwei Zustände. Während t_0 wird Energie gesammelt. Während t_A wird Energie genutzt. Das ist typisch für Energy-Harvesting-Systeme. Nun kann man für die bereitzustellende Energie E in einem bestimmten Zeitraum ($t_0 + t_A$) folgendes schreiben:

$$E = \sum_t P_0 \cdot t_0 + \sum_t P_A \cdot t_A$$

Die Zeit t_0 ist dabei oftmals unterschiedlich lang. Sie ist mindestens davon abhängig, wie lange es dauert, bis eine ausreichende Menge Energie von der Quelle gesammelt werden konnte. Manchmal kommen weitere Abhängigkeiten hinzu. Typischerweise gilt fast immer $P_0 \ll P_A$.

Angenommen, ein Mini-Spion (UKW-Sender o.ä.) benötigt zum Betrieb eine elektrische Spannung von 9 V. Dabei nimmt er einen Strom von 100 mA auf. Um diesen Sender einen Tag zu betreiben, wird eine Energie benötigt von:

$$\begin{aligned} E &= U \cdot I \cdot t \\ &= 9 \text{ V} \cdot 0,1 \text{ A} \cdot 24 \text{ h} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{\text{h}} \\ &= 77760 \text{ Ws} = 77,76 \text{ kWs} \end{aligned}$$

oder eben 77,76 kJ. Zum Vergleich:

Ein Mensch benötigt für seinen Lebenserhalt im Mittel 8400 kJ pro Tag. Diese Energie wird durch Verändern (Oxidieren) von Molekülketten aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff (Zucker und Fette) zu Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) gewonnen. Der menschliche Organismus erhöht die Entropie der Nahrung und gewinnt dadurch die Energie.

Ein handelsüblicher 9-V-Block-NiMH-Akku kann vielleicht 5 kJ liefern, wenn er in einem sehr guten Zustand ist. Danach ist er leer. Tatsächlich könnte man aber eine Überwachungsschaltung hinzufügen, die den Sender nur dann einschaltet, wenn gerade ein Gespräch im Abhörraum stattfindet. Angenommen, die Überwachungsschaltung benötigt einen Betriebsstrom von 1 mA (das ist schon üppig). Die durchschnittliche Gesprächsdauer pro Tag wird mit einer Stunde angenommen, dann kann man rechnen:

$$\begin{aligned} E &= U \cdot I_0 \cdot t_0 + U \cdot I_A \cdot t_A \\ &= 9 \text{ V} \cdot 1 \text{ mA} \cdot 23 \text{ h} + 9 \text{ V} \cdot 100 \text{ mA} \cdot 1 \text{ h} \\ &= 1,107 \text{ Wh} = 1,107 \cdot \text{Wh} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 3985,2 \text{ Ws} \end{aligned}$$

oder eben knapp 4 kJ. Diese Energiemenge kann ein 9-V-Block-Akkumulator (NiMH) liefern.

Das Beispiel soll die Zusammenhänge zeigen. Allerdings sind die Energiemengen beim Energy-Harvesting deutlich kleiner. Schaltungen, die mit Energy-Harvesting zu betreiben sind, müssen besonders energiesparend ausgelegt sein.

Beim Design einer elektronischen Schaltung hat man durchaus auch Einfluss auf den Energiebedarf. Es gibt zahlreiche Maßnahmen, um den Energiebedarf einer Schaltung gering zu halten.

1. Das beginnt damit, dass man sparsame Bauelemente auswählt. Operationsverstärker, Komparatoren und Linearregler mit niedrigem Ruhestrom sind gefragt.
2. Die gesamte Schaltung muss von vorn herein hochohmig ausgelegt sein. Spannungsteiler mit hochohmigen Widerständen (im $M\Omega$ -Bereich). Bei der Wahl der aktiven Bauteile ist darauf zu achten, dass diese im hochohmigem Umfeld funktionieren.
3. Mikrocontroller wie die Typenreihe MSP430 von Texas Instruments lassen sich in den „Schlafmodus“ schalten und werden erst wieder „wach“, wenn eine auszuführende Aufgabe ansteht. Während der „Schlafenszeit“ wird im besten Fall nur der Inhalt des Arbeitsspeichers erhalten. Dafür wird nur äußerst wenig Energie benötigt.
4. Taktfrequenzen sollten nur so hoch sein wie es unbedingt zur Erfüllung der Aufgabe notwendig ist. In erster Näherung steigt der Energieverbrauch einer digitalen Schaltung linear mit der Taktfrequenz.

1.2 • Besonderheiten der Energiequellen

Elektronische Schaltungen benötigen in der Regel eine konstante Versorgungsspannung, wobei die Spannungsquelle einen für den Anwendungsfall vernachlässigbaren Innenwiderstand haben sollte. Für den Anwendungsfall bedeutet dies: der Innenwiderstand der Quelle ist deutlich kleiner als der Widerstand der angeschlossenen Schaltung während des Betriebes.

Beim „Energy Harvesting“ versucht man, aus nicht elektrischen Energiequellen eine elektrische Spannungsquelle oder (seltener) eine elektrische Stromquelle zu formen. Das Ergebnis sind allerdings fast immer Quellen, die in ihren Eigenschaften von den idealen Strom- oder Spannungsquellen sehr weit entfernt sind.

Bei Spannungsquellen ist häufig der Innenwiderstand signifikant hoch. Zudem ist die Ursprungsspannung in den seltensten Fällen zur direkten Versorgung elektronischer Schaltungen geeignet. Bei Stromquellen ist es oft umgekehrt: der Innenwiderstand ist vergleichsweise klein und die gelieferten Ströme sind nicht konstant.

Oftmals ist eine Zuordnung der zur Verfügung stehenden Energiequelle als Strom- oder Spannungsquelle gar nicht mehr sinnvoll. In anderen Fällen ändert sich das Verhalten je nach Betriebszustand.

Eine weitere Besonderheit ist die zeitliche Verfügbarkeit. Typische Energiequellen beim „Energy Harvesting“ liefern nicht permanent Energie, sondern temporär. In der Regel stimmen die Zeiten währenddessen die Energiequelle liefert, nicht mit den Zeiten überein während Energie benötigt wird.

Diese Einschränkungen erfordern in jedem Fall besondere Maßnahmen zur Aufbereitung der ankommenden Energie. Dazu gehören

- Sammeln und Speichern der Energie während der Zeit, in welcher der Verbraucher nicht aktiv ist. Dies kann im einfachsten Fall elektrisch geschehen mit Hilfe von Kondensatoren oder Akkumulatoren. Aber es gibt auch Beispiele, bei denen die Energie mechanisch mit Hilfe von Schwungrädern oder angehobenen Gewichten zwischengespeichert wird (potentielle Energie).
- Abwärtswandler: bei Quellen mit hohen Quellspannungen werden diese umgewandelt in solche mit kleinen Quellspannungen, wobei sich der Innenwiderstand verkleinert.
- Aufwärtswandler: bei Quellen mit kleinen Quellspannungen werden diese umgewandelt in solche mit größeren Quellspannungen - einhergehend mit einer Vergrößerung des Innenwiderstandes.
- Stromquellen in Spannungsquellen wandeln. Manche Quellen für „Energy Harvesting“ verhalten sich wie Stromquellen. Elektronische Schaltungen benötigen aber konstante Gleichspannungen zum Betrieb. Dafür ist eine Wandler-schaltung vorzusehen.

Durch diese, zur Anpassung vorgesehenen, Schaltungen geht Energie verloren. Da beim „Energy Harvesting“ nur wenig Energie zur Verfügung steht, müssen diese Schaltungen besonders sorgfältig entwickelt werden. Das Ziel ist die Minimalisierung der Verluste. Dazu gehören fast immer auch Steuer- und Regelungsschaltungen, die ebenfalls auf geringsten Energieverbrauch optimiert sein müssen.

1.3 • Aufbereitung

Wie zu erkennen ist: Die direkte Nutzung der Energie aus der Umwelt ist nicht möglich. Leider ist immer eine Aufbereitung erforderlich um dann damit eine elektronische Schaltung zu versorgen. „Leider“ deshalb, weil mit der Aufbereitung auch wertvolle Energie verloren geht. Hier nun möchte ich einen groben Überblick geben, was die Aufbereitung bedeutet. Details und konkrete Möglichkeiten sind dann in den einzelnen Kapiteln bei den Projekten zu finden.

Das Bild 1.2 zeigt ein typisches Blockschaltbild eines Energy-Harvesting-Systems. Die Energie aus der Umwelt gelangt in einen Energiewandler, dessen Aufgabe es ist, aus der Umgebungsenergie, die in irgendeiner Form vorliegt, eine elektrische Spannung zur Verfügung zu stellen.

Damit wir als „Maker“ mit handelsüblichen Bauteilen auskommen, benötigen wir eine elektrische Gleichspannung von mindestens 1,2 V – gerne mehr! Um dies sicherzustellen, ist fast immer eine Energieaufbereitung erforderlich.

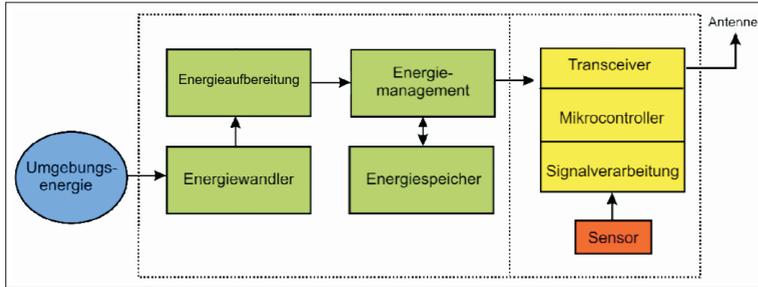


Bild 1.2 • Schema eines Energy-Harvesting-Systems mit Verbraucher.

Da die Energie in der Regel nur zeitweise geerntet werden kann, benötigt man meistens auch einen Speicher. Ein Energie-Management verwaltet die eingehende Energie und entscheidet unter anderem über die Weitergabe an den Verbraucher oder die Speicherung. Damit kann der Verbraucher zu beliebigen Zeiten agieren und ist nicht davon abhängig, wann gerade Energie geliefert wird.

Beim Verbraucher handelt es sich meistens um einen Sensor, der die erfassten Werte z.B. über eine Funkverbindung weitergibt oder als Datenlogger einfach sammelt. Dies ist im Bild 1.2 an der rechten Seite dargestellt. Dazu gehört meistens auch ein Mikrocontroller (oftmals beinhaltet auch das Energiemanagement einen Mikrocontroller). Sollen die Daten drahtlos übermittelt werden, fehlt noch ein Sender (Transceiver). Der Verbraucher muss natürlich auf Sparsamkeit optimiert sein. Er muss mit möglichst wenig Energie auskommen. Am besten „schläft“ er die meiste Zeit und wird nur aktiv, wenn Daten aufgenommen, übertragen oder gesammelt werden sollen.

Alle Schaltungen zur Energiewandlung, Energieaufbereitung und zum Energiemanagement müssen natürlich ebenfalls aus der Umgebungsenergie gespeist werden, da ja eine andere Quelle nicht zur Verfügung steht.

1.3.1 • Energie wandeln

Bei der Wandlung sind zwei Fälle zu unterscheiden: Der Wandler erhält die Energie in Form einer Gleichspannung (z.B. von einer Solarzelle) oder er erhält eine Wechselspannung (z.B. von einem Dynamo).

1.3.1.1 • Gleichspannung aufbereiten

Die Spannungen sind oftmals winzig – häufig ist deren Wert unter 500 mV. Um eine verwertbare Spannung zu erhalten, wird bei Gleichspannungsquellen als Energiewandler gerne ein sogenannter „Joule Thief“ eingesetzt. Das Prinzip von „Joule Thiefs“ ist altbekannt: in Elektronik-Büchern aus den 50er Jahren ist das Prinzip des Joule Thiefs umfassend erklärt. Dort hießen diese Schaltungen „Sperrwandler“ (und so heißen sie auch noch heute). Beim Sperrwandler handelt es sich um eine diskrete elektronische Schaltung, die eine kleine elektrische Gleichspannung in eine höhere elektrische Spannung transformiert. Im Bild 1.3 ist eine Schaltung aus dem Jahre 1969 zu sehen. Diese Schaltung wurde eingesetzt um aus einer Zink-Kohle-Batterie zelle (Monozelle) eine Hochspannungs-Blitzlampe auszulösen.

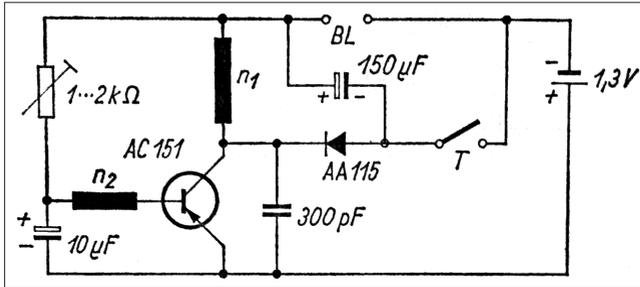


Bild 1.3 • Schaltbild eines Sperrwandlers („Joule Thief“) aus den 60er-Jahren. Entnommen aus [17].

Diese Schaltung funktioniert auch heute noch: Die Spulen n_1 und n_2 sind gut magnetisch verkoppelt. Fließt in n_1 ein Strom, dann wird in n_2 ein Strom induziert. Die Polarität ist so gewählt, dass der Strom aus n_2 den Transistor weiter öffnet. Irgendwann kann der Kollektorstrom und damit der Strom durch n_1 aber nicht mehr ansteigen (ein Transistor ist eine gesteuerte Stromquelle). Dann wird in n_2 kein Strom mehr erzeugt und der Transistor sperrt abrupt. Die Rückschlagspannung am Kollektor ist so groß, dass der 150- μF -Kondensator über die Germanium-Diode AA115 geladen wird.

Für den Einsatz beim Energy-Harvesting sind wenige Anpassungen erforderlich: der Schalter T entfällt, und BL wird gebrückt. Anstelle der Monozelle wird die Energiequelle angeschlossen (Solarzelle, Thermoelement, etc.).

Die Verbraucherspannung wird beim Energy-Harvesting dann parallel zum 150- μF -Kondensator abgenommen. Heute könnte man 1000 μF oder mehr einsetzen. Zum Schutz des angeschlossenen Verbrauchers kann es sinnvoll sein, parallel zum Kondensator auch eine Zenerdiode anzubringen. Diese schützt den angeschlossenen Verbraucher vor Überspannung. Aus meiner Erfahrung stellt eine Zenerdiode oftmals aber bereits eine zu große Belastung des Sperrschwingers dar. Besser ist eine angepasste Dimensionierung auf die zu versorgende Last, so dass erst gar keine Überspannung auftritt. Die beiden Wicklungen n_1 und n_2 mit jeweils 60 Windungen werden am besten aus Kupferlackdraht auf einen Schalenkern (Bild 1.4) gewickelt. Der Wickelsinn ist zu beachten. Ist der Wicklungsanfang von n_1 am Kollektor des Transistors, dann muss der Wickelanfang von n_2 an der Seite mit dem Trimpotentiometer sein. Die Schaltung wie im Bild 1.3 schwingt selbständig an, wenn die Eingangsspannung angelegt wird und einen Mindestwert von ca. 500 mV erreicht. Bei einem Versuchsaufbau betrug die Schwingfrequenz etwa 8 kHz.



Bild 1.4 • Ein Schalenkern (links) und ein Ringkern (rechts) beide sind für den Bau von Sperrwandlern gut geeignet.