



Energy-Harvesting

Kleine Ernte – großer Nutzen

Teil 2



Die Beschreibung der verblüffenden Vielfalt der Möglichkeiten, aus der Umwelt Energien in nahezu beliebigem Maßstab zu ernten, wird fortgesetzt. Der Leser muss sich bewusst sein, dass die hier vorgelegte Zusammenstellung bei Weitem nicht erschöpfend ist. Weil an diesem wichtigen Thema weltweit intensiv geforscht wird, entsteht ständig neuer interessanter Stoff, der es wert ist, das Thema in der Zukunft erneut aufzugreifen.



Wärmeenergie aus Abgasen. Autofirmen testen derzeit den Einsatz von thermoelektrischen Generatoren, um aus der Restwärme der Abgase elektrischen Strom für die elektrischen Systeme im Pkw zu gewinnen. So ließen sich schätzungsweise etwa 9 % des verbrauchten Kraftstoffs einsparen. In einem siebenjährigen, vom U.S. Department of Energy geförderten Forschungsprojekt hat die amerikanische Firma Amerigon (inzwischen zu Gentherm umfirmiert) mit den Partnern Ford und BMW thermoelektrische Generatoren entwickelt. Sie sind im Abgasstrang eines Lincoln und eines X6 montiert und liefern knapp 500 W elektrische Leistung bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von etwa 100 km/h (Bild 17). Eine ähnlich effiziente Energiegewinnung ist aus der Abwärme des Fahrzeugkühlsystems möglich.

Weitere potenzielle Anwendungsgebiete sind u. a. Kraftwerke, Rechenzentren und industrielle Fertigungseinrichtungen, wo bis jetzt Abfallwärme ungenutzt über Kühltürme und andere Wärmetauscher zur uneffizienten Erwärmung der Umwelt abgeführt wird.

Bei Einspeisung von Gleichstrom ist wegen der Umkehrbarkeit des Seebeck-Effekts eine Abkühlung bzw. Erwärmung der beiden Seiten eines thermoelektrischen Generatormoduls (TEG) festzustellen (Peltier-Effekt). Eine derartige thermoelektrische Wärmepumpe ist in vielen Technikbereichen einsetzbar, von der Kühlbox bis zur integrierten Kühlung von Halbleiterchips.

Dünnsfilm-TEG. Das Freiburger Unternehmen Micropelt (ein 2006 gegründeter Spin-off des Halbleiterherstellers Infineon und des Fraunhofer Instituts für Physikalische Messtechnik mit dem Schwerpunkt TEG) ging mit dem Einsatz von Dünnsfilm-Wafern und mikromechanischen Herstellmethoden neue Wege. Die thermoelektrischen Elemente bestehen aus je einer Halbleiterstruktur mit pyramidenstumpfförmigen Kegeln aus p- und n-leitendem Material, die getrennt auf zwei Siliziumdioxidsubstraten hergestellt werden. Die thermoelektrischen Bi₂Te₃-Materialien werden durch Sputtering (Kathodenzerstäubung) auf dem Substrat aufgebracht.

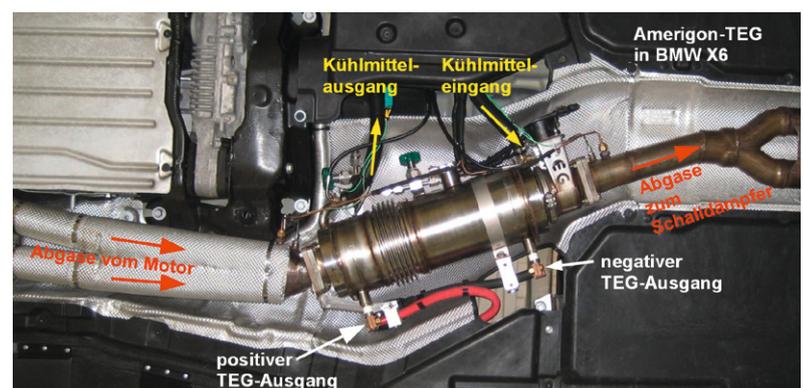


Bild 17: Ein halbes Kilowatt elektrische Leistung liefern die heißen Abgase eines Pkw-Motors. Quelle: Gentech

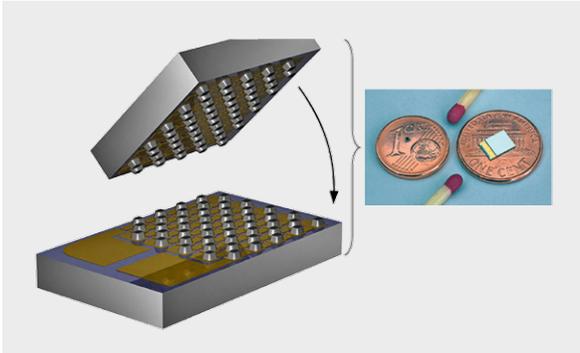


Bild 18: Zwei durch Sputtering hergestellte Dünnfilm-Wafer werden zu einem TEG zusammengefügt.

Nach dem Sägen fügt man die Teilstücke durch spezielle Bonding-Techniken zum Thermogenerator zusammen (Bild 18). Den fertigen TEG als TGP (Thermogenerator in Package) zur vereinfachten Montage in vielfältigen Anwendungen zeigt Bild 19. Der Umwandlungsfaktor liegt bei 140 mV/K.

Den Einsatz in einem Nahfeld-Harvester-Demonstrator zeigt Bild 20. Die linke Seite (Heißeite) wird an ein heißes Rohr angeflanscht, die rechte Seite (Kaltseite) liegt auf Raumtemperatur.

Die elektrische Ausgangsleistung bei diversen Heißeitentemperaturen und 20 °C Kaltseitentemperatur zeigt Bild 21. Bei einer Temperaturdifferenz von 20 °C steht dauerhaft ungefähr 1 mW Leistung an einem Lastwiderstand von 300 Ω zur Verfügung.

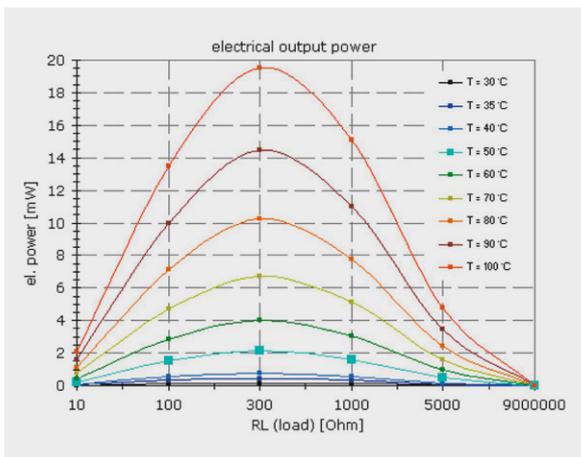


Bild 21: Bei nur 20 °C Temperaturdifferenz zwischen Heiße- und Kaltseite des Demonstrators wird jährlich der Energieinhalt von drei AA-Batterien „geerntet“. Quelle: Micropelt



Bild 22: Ein TEG zur Gewinnung der Stellenergie eines autarken Heizkörperthermostaten

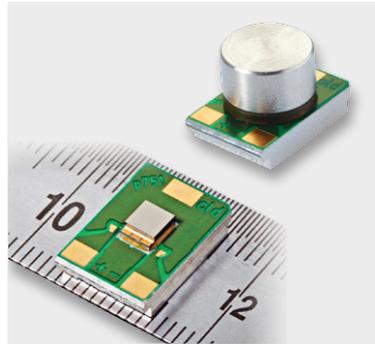


Bild 19: Besonders einfache in eine Applikation integrierbarer TGP (Thermogenerator in Package). Quelle: Micropelt



Bild 20: Ein Nahfeld-Harvester-Demonstrator nutzt die Temperaturdifferenz zwischen einem Warmwasserrohr und der Umgebung. Quelle: Micropelt

Auf das ganze Jahr hochgerechnet ergibt sich eine Energieausbeute, die etwa dem Energieinhalt von drei AA-Batterien entspricht. 80 °C Temperaturdifferenz bewirken bereits ein Leistungsangebot von knapp 20 mW (entspricht 60 AA-Batterien).

Anwendung Heizkörperstellantrieb. Zwischen dem Vorlauf eines Heizkörpers und der Temperatur in seiner unmittelbaren Umgebung besteht ein Temperaturgefälle, aus dem ein TEG elektrische Energie gewinnen kann (Bild 22). Diese genügt bereits für elektromechanische Verstellaufgaben, wie sie bei funkgesteuerten autarken Heizkörperthermostatventilen auftreten. Allerdings sind konventionelle Stellmotoren wegen ihres hohen Energieverbrauchs durch energieoptimierte Varianten zu ersetzen.

Ein entsprechendes Produkt iTRV (Intelligent Thermostatic Radiator Valve) hat Micropelt bereits mit Industriepartnern entwickelt (Bild 23). Der Heizkörperstellantrieb kann überschüssige Energie speichern und funktioniert dadurch auch bei geringen Vorlauftemperaturen in den Übergangsmonaten. Er kommuniziert drahtlos über Funk (EnOcean-Standard 868,3 MHz [ISO/IEC 14543-3-10] oder 2,4 GHz) mit einem entsprechenden Raumthermostaten. Die Funktion mit mehreren Stellvorgängen am Tag und einer regelmäßigen Kommunikation mit dem Raumthermostaten ist bereits ab einer Vorlauftemperatur von 32 °C gegeben. Im Sommer bei abgeschalteter Heizung geht iTRV in einen Schlafmodus und wacht automatisch beim Wiedereinschalten der Heizung auf.

Strahlungsenergie. Hierunter verstehen wir elektromagnetische Felder jeglicher Frequenz. Die Gewinnung elektrischer Energie aus Licht, dem sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums, übernehmen Solarzellen. Man denke an solargespeiste Ladegeräte, Radios, Gartenlampen, Teichpumpen, Hausnummerbeleuchtungen usw. Aber auch bereits bei geringen Beleuchtungsstärken lässt sich ausreichend Energie für den Betrieb vieler Geräte „ernten“. So können z. B. Solaruhren bei Raumbeleuchtung problemlos eine erhebliche Gangreserve aufbauen oder Radios mit Ohrhörern betrieben werden oder Solarladegeräte Energie zur Ladung von Mobiltelefonen sammeln (Bild 24).

Der Wirkungsgradrekord von Solarzellen liegt heute bei 44,4 %. Diesen vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) bestätigten Wert hat Hersteller Sharp bei seiner Dreischicht-Mehrfachsolarzelle mit vorgeschalteter Fresnel-Linse als Konzentrador gemeldet (Bild 25). Der Schichtenaufbau der 4x4-mm-Sharp-Zelle besteht aus infrarotempfindlichen Indiumgalliumarsenid (InGaAs) unten, Galliumarsenid (GaAs) für den nahen Infrarotbereich in der Mitte und zuoberst Indiumgalliumphosphid (InGaP).

Ein aktuelles Beispiel für die Inanspruchnahme elektromagnetischer Wellen liefert das passive NFC-Tag (NFC: Near Field Communication). Der NFC-Tag gewinnt aus dem Feld eines Senders seine eigene Betriebsenergie und moduliert dieses Feld, um eine Nachricht an den Sender zu übertragen. Hier wird also ein speziell für diesen Zweck erzeugtes Feld



Bild 23: Ein autarkes, funkbasiertes Heizkörperventil, das in Verbindung mit intelligenten Raumthermostaten Energie sparen hilft. Quelle: Micropelt



Bild 24: Zahllose aus dem Umgebungslicht gespeiste Geräte gibt es heute schon: von der Uhr über das Radio mit MP3-Player bis zur Power-Bank.

sowohl für die Energie- als auch für die Datenübertragung genutzt.

Aber auch die in Elektrosmog oder in dedizierten Versorgungsfeldern enthaltene elektromagnetische Energie kann durch geeignete Antennen angezapft und mit darauf spezialisierter Ultra-Low-Power-Elektronik geerntet werden. Es gibt also in unserem Umfeld eine große Vielzahl durch den Menschen produzierter elektromagnetischer Nutzsignale, die zusammen mit Sekundärstörungen eine „elektromagnetische Umweltverschmutzung“ (Man Made Noise) erzeugen. Nicht zuletzt wirken aus dem Weltall zahllose Strahlungsquellen auf die Erde ein. Allerdings sind die Erträge aus diesen Quellen äußerst geringfügig.

Das klassische Beispiel aus den Anfangstagen des Rundfunks für über eine Langdrahtantenne dem Feld eines Radiosenders entnommene Energie ist der Detektorempfänger. Zu seiner Funktion ist keinerlei sonstige Energiequelle erforderlich.

Grundsätzlich lassen sich bereits im Umfeld des zu versorgenden Geräts vorhandene bekannte Ausstrahlungen (Rundfunk, Mobilfunk, WLAN ...), aber auch unerwartete, zufällig angetroffene anzapfen. Wenn das nicht ausreicht, kann man die Betriebsenergie über das HF-Feld eines Speisesenders den drahtlos arbeitenden Geräten per Funk übermitteln. Diesen Weg verfolgt die amerikanische Firma Powercast [6] für Indoor-Anwendungen (Bild 26 links). Mit dieser Methode lassen sich mit vergleichsweise geringen Sendeleistungen (EIRP: 1 W oder 3 W) über wenige Meter für Micro-Energy-Harvesting-Maßstäbe kräftige Energien übertragen. Die Energieausbeute hängt von vielen Faktoren ab: Richtwirkung der Antennen, Frequenzbereich, Distanz ... Das System ist zurzeit nur in Nordamerika und Kanada zugelassen und kann freie Entfernungen von 12 bis 14 m überwinden. So attraktiv die Idee auf den ersten Blick scheint, es ist fraglich, ob sie in Deutschland zum Einsatz kommen wird. Da gibt es zuvor regulatorische Hürden (Bundesnetzagentur) und die Befürchtung vieler Menschen, elektromagnetische Strahlung könnte schädliche Auswirkungen auf die Gesundheit haben, zu überwinden.

Einen Schritt weiter geht das Konzept des „Ambient Backscattering“, übersetzt etwa „Rückstreuung im Umfeld“. Mit diesem Verfahren können batterieleose Mini-Ultra-Low-Power-Geräte im nahezu allgegenwärtigen

Funkfeld eines Rundfunk-, Wi-Fi- oder Mobilfunksenders miteinander auf kurzen Distanzen kommunizieren (Bild 27). Eine detaillierte Beschreibung des an der University of Washington entwickelten Verfahrens findet man in dem Aufsatz „Ambient Backscatter: Wireless Communication Out of Thin Air“ [7].

Hier die prinzipielle Funktionsweise von Ambient Backscatter (ABS) in Kürze: ABS tritt in einem elektromagnetischen Feld immer dann auf, wenn die Welle auf eine Inhomogenität der Ausbreitungsbedingungen auf ihrem Ausbreitungspfad trifft. Im Falle eines TV-Senders kann dies ein Hochhaus sein, aber auch die um Größenordnungen kleinere Antenne eines Sender-Empfängers (Transceiver), der seine

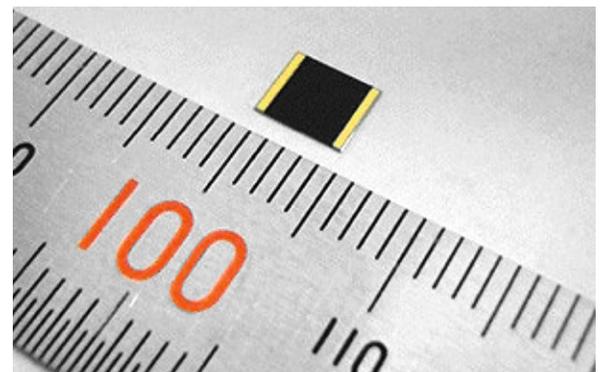


Bild 25: Kleiner Weltmeister mit großem Wirkungsgrad: Diese Dreischicht-Mehrfachsolarzelle mit vorgeschalteter Fresnel-Linse als Konzentrador von Sharp setzt 44,4 % der eingestrahlten Lichtenergie in elektrische Energie um. Quelle: Sharp



Bild 26: Wo hochfrequente Strahlungsfelder existieren, kann Energie geerntet werden. Quelle: Powercast

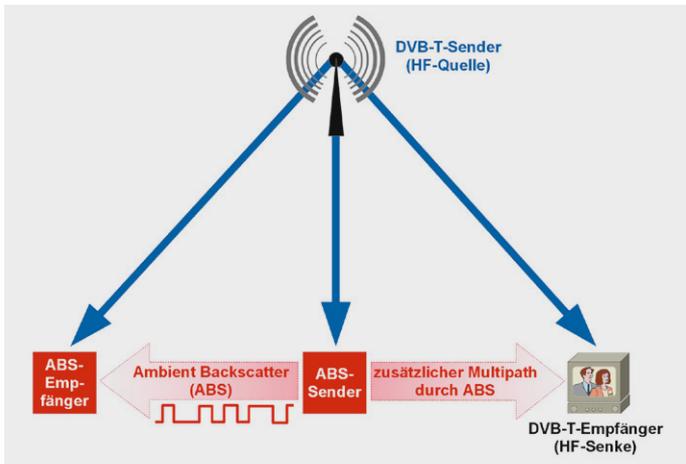


Bild 27: Funkverbindung ohne eigenes Sendefeld und Stromquelle: ABS-Technologie (Ambient Backscattering) macht es möglich.

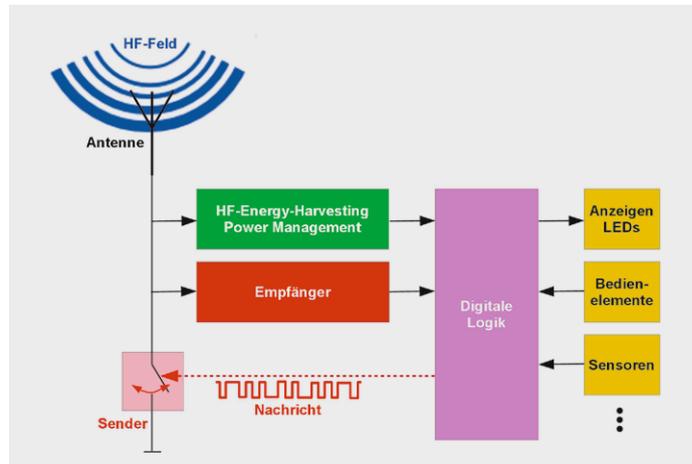


Bild 28: Das vereinfachte Blockschaltbild eines ABS-Transceivers

Betriebsenergie aus dem TV-Sender-Feld „erntet“. Indem man deren Impedanz im Rhythmus einer digitalen Sendenachricht ändert, wird die Welle am Ort der Antenne mehr oder weniger stark reflektiert (Bild 28). Eben diesen Vorgang nennt man „Ambient Backscattering“. Die Antenne

eines Empfängers in kleinem Abstand zum Sender findet nun das ursprüngliche elektromagnetische Feld zuzüglich eines geringen, vom Sender mit der Nachricht modulierten, reflektierten Anteils vor. Wenn der Empfänger diesen isoliert, ist er im Besitz der Nachricht, ohne dass der Sender ein eigenes elektromagnetisches Feld für deren Übertragung erzeugen musste. Er benutzt gewissermaßen die ohnehin vorhandenen hochfrequenten Wellen des Feldes. Für einen in der Nähe befindlichen digitalen TV-Empfänger ist das Rückstreusignal nur ein weiterer winziger Multipath-Anteil in seinem Empfangssignal, den er durch seine inhärente Resistenz ignoriert. Wenn Backscatter-Sender und TV-Empfangsantenne also nicht unmittelbar nebeneinander liegen, sind keine Bild- und Tonstörungen zu erwarten.

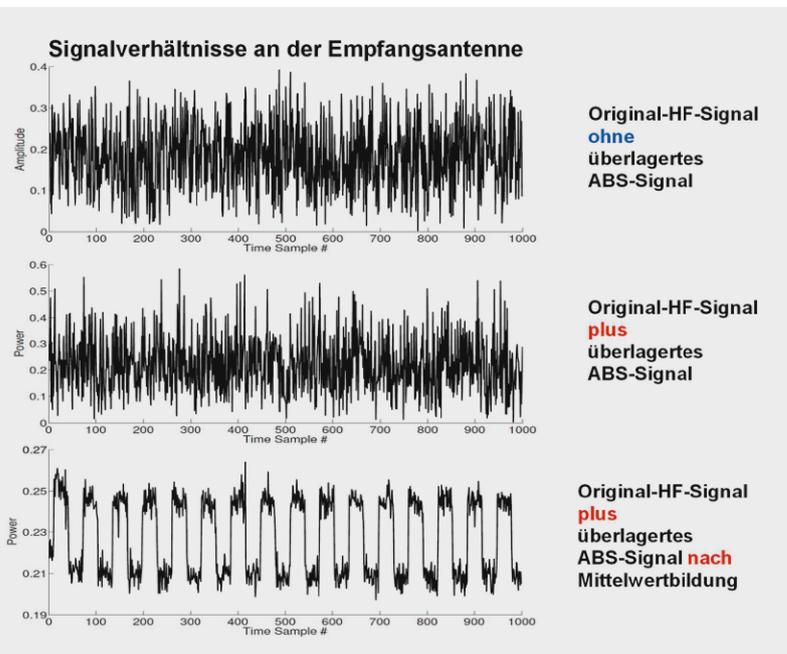


Bild 29: Weil das vorliegende HF-Feld und das Backscatter-Nutzsignal unkorreliert sind, lässt sich Letzteres wiedergewinnen.

Die Frequenz des TV-Feldes ist mit einigen 100 MHz erheblich höher als die Backscatter-Frequenz von wenigen kHz. Deshalb kann man mittels geeigneter Durchschnittsbildung aus dem Signalgemisch an der Empfängerantenne das ABS-Signal wiedergewinnen. Das ist darin begründet, dass Abtastwerte des TV-Signals während der vergleichsweise langen ABS-Perioden weitgehend unkorreliert sind. Bild 29 zeigt die Zeitsignale an der Empfangsantenne. Das obere Signal erzeugt ein amerikanischer Digital-TV-Sender (Bild 29 oben), der das überwiegend in Nordamerika verwendete Modulationsverfahren 8VSB (Acht-Pegel-

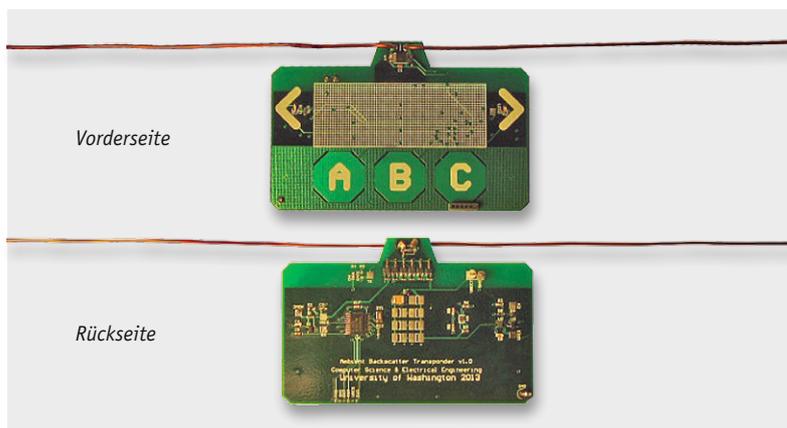


Bild 30: Mit diesem Prototyp wurde die Praxistauglichkeit des ABS-Verfahrens nachgewiesen. Quelle: University of Washington



Bild 31: Dieser mNode-Funk-Sensor von Micropelt bezieht seine Energie aus dem Magnetfeld einer Stromschiene und überwacht ständig deren Temperatur, um Unregelmäßigkeiten im Betrieb aufdecken zu können. Quelle: Micropelt



Restseitenband) verwendet. Es ist im digitalen TV-Standard des Advanced Television Systems Committee (ATSC) festgelegt. Das mittlere Signal (Bild 29 Mitte) zeigt das kaum unterscheidbare Antennensignal mit einem additiven ABS-Anteil. Erst nach der Mittelwertbildung über jeden hundertsten Abtastwert des Empfangssignals (Bild 29 unten) treten die Korrelationen im ABS-Signal deutlich erkennbar in Erscheinung.

Anhand mehrerer Prototypen (Bild 30) wurde die Realisierbarkeit des ABS-Konzepts belegt. Damit ließen sich Daten mit einer Rate von 1 kbit/s bis zu 1 m weit übertragen. Eine Referenzanwendung, bei der ein geleertes Regalfach im Supermarkt automatisch auf sich aufmerksam macht und das Nachfüllen veranlasst, war erfolgreich. Die Entwickler glauben, durch Optimierung der Bausteine ihres Systems Reichweite und Übertragungsbandbreite deutlich steigern zu können.

Magnetfeldenergie. Auf dem Prinzip des induktiven Energy-Harvesting aus magnetischen Wechselfeldern bauen passive NFC-Tags auf. Die Funktion der Sendespule kann jedoch jeder von Wechselstrom durchflossene Leiter übernehmen. Dabei entsteht ein konzentrisches Magnetfeld, das in Amplitude und Drehrichtung der Feldlinien in Abhängigkeit vom Momentanwert des Stroms oszilliert.

In Transformatorenstationen und Schaltschränken, wo durch kräftige Kupferschienen die Phasenströme von energiehungrigen Verbrauchern in der Größenordnung von Hunderten von Ampere fließen, lassen sich aus den begleitenden Magnetwechselfeldern ausreichende Energien durch Induktion in einer Empfängerspule „ernten“, um autarke, galvanisch isolierte Temperatursensoren zu betreiben, die ihre Messwerte per Funk an eine Überwachungszentrale übertragen. Das ist bei derartigen Kupferschienen sehr wichtig, denn ein Temperaturanstieg signalisiert ein nahendes Problem. Dies könnte eine lose Verbindung an den Stromschienen, Korrosion und Verschmutzung, Überlastung, eine ausgefallene Kühlung usw. sein.

Bild 31 zeigt einen mNode-Sensor von Micropelt. Er wird auf die Stromschiene aufgeklemmt und deckt durch ständige Messungen rund um die Uhr mit Temperatur-Trendanalysen Fehlerquellen frühzeitig auf. Weil er seinen Energiebedarf vollständig aus den Magnetfeldern der Stromschienen deckt, ist keine Betriebsunterbrechung erforderlich, die beim Wechsel von Batterien zwingend wäre.

Mechanische Energie. Als praktisches Beispiel für einen durch Fingerdruck betätigten elektrodynamischen Energy-Harvester soll das Energiemodul ECO 200 von EnOcean, einem Pionier für die batterielose Funktechnik genannt werden (Bild 32). In Kombination mit dem Aufbereitungs- und Funkmodul PTM 330 (868 MHz) können mit einem durch Fingerdruck ausgelösten Stromimpuls drei Subtelegramme ausgesendet werden.

Die International Electrotechnical Commission (IEC) hat im März 2012 mit ISO/IEC 14543-3-10 einen neuen Standard für Funkanwendungen mit einem besonders niedrigen Energieverbrauch ratifiziert. Es ist der erste und einzige Funkstandard, der auch für Energy-Harvesting-Lösungen – und damit für die batterielose Funktechnologie von EnOcean – optimiert ist. Zusammen mit den Anwendungsprofilen (EnOcean Equipment Profiles, EEPs) der EnOcean Alliance schafft dieser internationale Standard die Voraussetzungen für eine vollständig interoperable, offene Funktechnologie, vergleichbar mit Standards wie Bluetooth oder Wi-Fi. Der Standard steht unter www.iso.org zum Download bereit. Mittlerweile haben sich zahlreiche Unternehmen in der EnOcean Alliance zusammengefunden, die eine bereits umfassende, aber ständig wachsende Produktpalette anbieten [8].

In der Medizin wird intensiv geforscht, um Energy-Harvesting im Körper zum wartungsfreien Betrieb von Implantaten einzusetzen. Ein Beispiel ist der Herzschrittmacher. Er muss bisher etwa alle zehn Jahre ausgetauscht werden, wenn die Batterie erschöpft ist. Diverse Ansätze werden verfolgt, dies zu vermeiden und die Energie im Körper zu

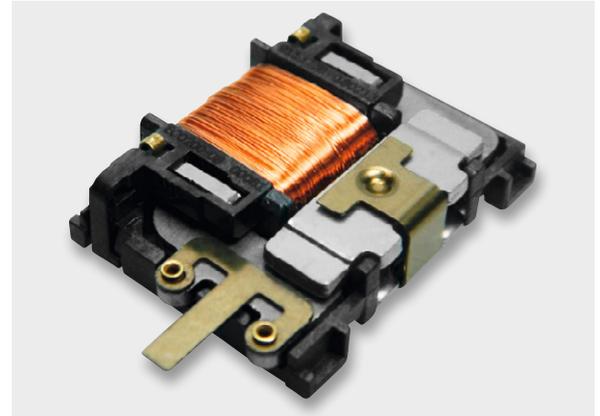


Bild 32: High-Tech-Schalterersatz mit Ultra-Low-Power-Bedarf: Aus einem Fingerdruck erzeugt der elektrodynamische Energy-Harvester im EnOcean-Energiemodul ECO 200 genügend Energie, um drei Subtelegramme in Richtung Aktor absetzen zu können. Quelle: EnOcean

„ernten“. Z. B. könnten in Zukunft Piezo-Nanodrähte aus dem Schlagen des Herzmuskels selbst elektrische Energie abzweigen oder eine Bio-Brennstoffzelle sich aus der chemischen Umwandlung von Blutzucker speisen. Noch ist es bis zur Marktreife solcher Ideen ein weiter Weg, aber deren Realisierung liegt vielleicht näher als geahnt.

Schallenergie. Energy-Harvesting aus den allgegenwärtigen Umweltgeräuschen scheint auf den ersten Blick abwegig, ist es aber nicht. Im Grunde ist jedes Mikrofon ein Miniwandler von Schallenergie (Luftdruckschwankungen) in elektrische Spannung. Vom Rauschen des Windes in den Bäumen über das Prasseln von Regentropfen bis zum Industrie- und Verkehrslärm stehen uns praktisch nie versiegende Energiequellen mit unterschiedlicher Ergiebigkeit zur Verfügung.

Aus Korea kommt das Konzept des Sonic Energy Absorbers (SONEA). Auf [9] wird vorgerechnet, dass beim Start eines Flugzeugs aus der produzierten Geräuschkulisse 240 kW elektrische Leistung gewonnen werden könnte. In Schallschutzwänden integriert wären beträchtliche Energien zu mobilisieren.

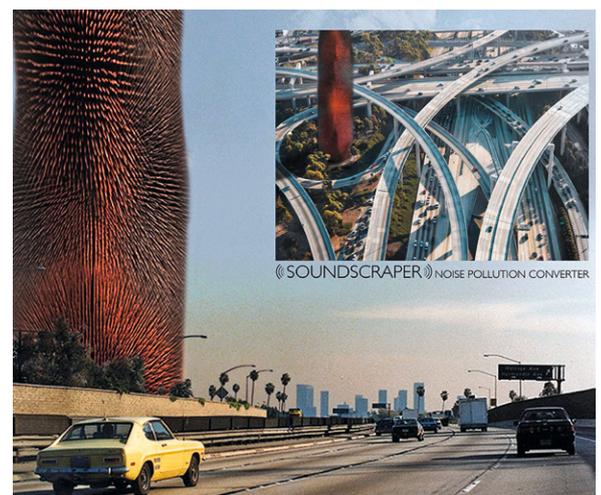


Bild 33: Eine utopisch anmutende Idee: Soundscrapper entziehen dem Verkehrslärm Energie, mit der die Straßen beleuchtet werden könnten. Quelle: eVolo



In die gleiche Richtung geht der Soundscaper, dessen Entwurf 2013 beim jährlichen Ideenwettbewerb der amerikanischen Architekturzeitschrift eVolo eingereicht wurde (Bild 33). Er soll aus dem Lärm der Großstädte beträchtliche Energiemengen durch Absorption ernten und dabei die akustische Umweltverschmutzung reduzieren. Nach Berechnungen der Einreicher könnte ein einziger 100 m hoher Soundscaper 10 % der Energie ernten, die Los Angeles für die Straßenbeleuchtung aufwendet.

Fazit. Energy-Harvesting ist in nahezu jedem Maßstab möglich. Eine schier unendliche Vielzahl von Energieformen in der Umwelt wartet nur darauf, „geerntet“ zu werden. In der Halbleitertechnik geht der Trend zu immer sparsameren Chips mit abnehmender Betriebsspannung. Für sie bieten sich die variantenreichen Methoden des Micro-Energy-Harvesting zur zuverlässigen, autarken, d. h. draht- und batterielosen Stromversorgung an. Wenn zudem die Datenübertragung funkbasiert erfolgt, sind extrem flexible, wartungsfreie und zuverlässige Sensornetzwerke möglich. In der industriellen Fertigung, im Energiemanagement moderner Gebäude, in der Medizin- und Umwelttechnik und in zahllosen weiteren Bereichen eröffnet Energy-Harvesting den Weg zu völlig neuartigen, mit regenerativer Energie betriebenen Applikationen.

So leistet Energy-Harvesting einen Beitrag zur Steigerung der Nachhaltigkeit bestehender technischer Lösungen bei gleichzeitig erhöhtem Nutzen und Komfort. **ELV**



Quellen:

- [6] www.powercastco.com
- [7] <http://homes.cs.washington.edu/~gshyam/Papers/amb.pdf>
- [8] www.enocean-alliance.org/de/produkte/
- [9] www.yankodesign.com/2009/09/09/sona-converts-sound-to-energy/



Weitere Infos:

www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/merit_review_2012/adv_combustion/ace080_lagrandeur_2012_o.pdf
www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/thermoelectrics_app_2012/tuesday/crane.pdf
www.micropelt.com/down/datasheet_te_power_plus.pdf
www.micropelt.com/applications/te_power_node.php
www.micropelt.com/down/datasheet_te_power_node.pdf
www.energyprofi.com/jo/waermerueckgewinnung.html
www.gizmag.com/scavenging-ambient-electromagnetic-energy/19163/
<http://revolution-green.com/ambient-backscatter-free-energy-harvesting/>
www.powercastco.com/power-calculator/
<http://homes.cs.washington.edu/~gshyam/Papers/amb.pdf>