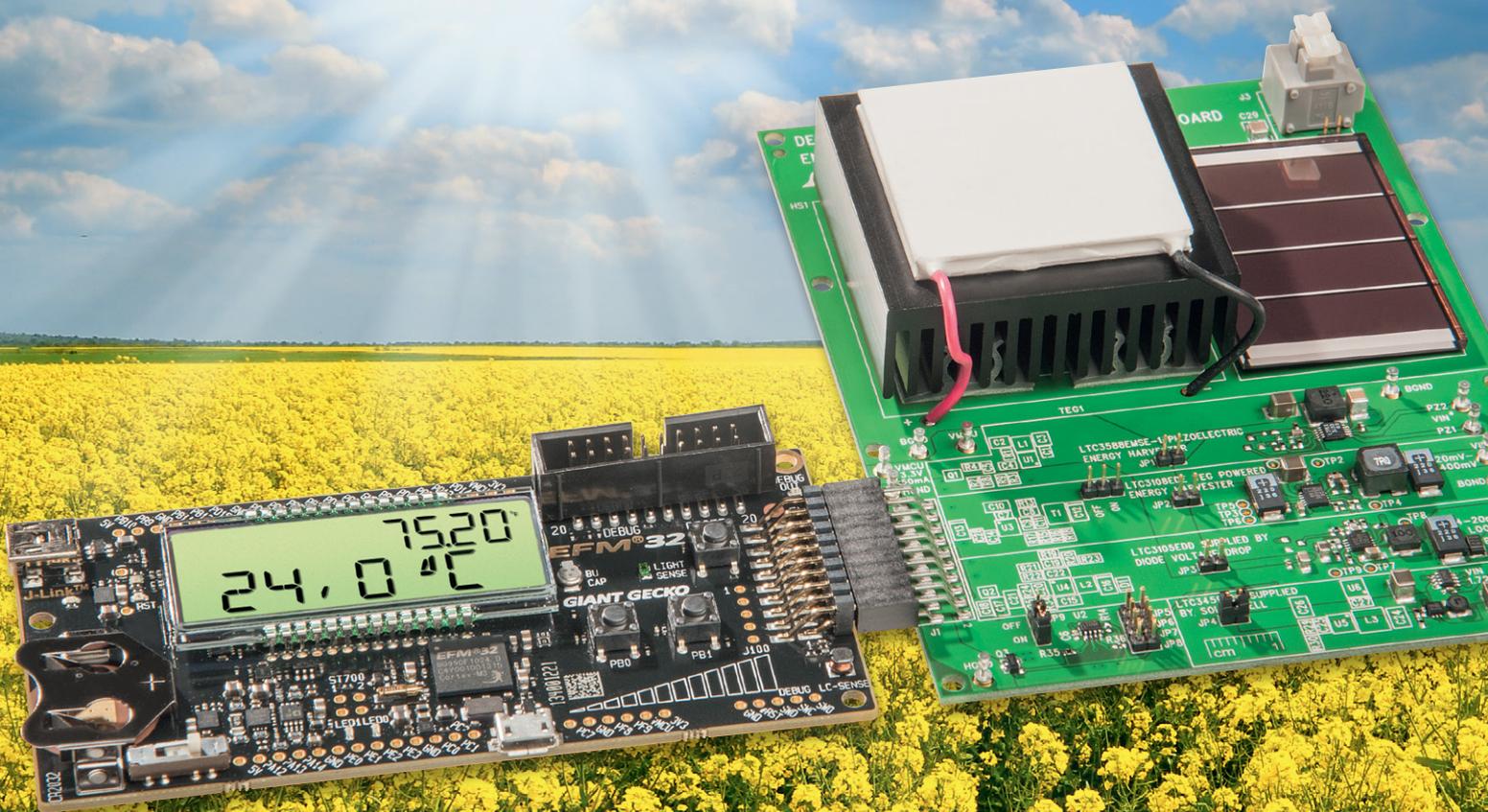




# Energy-Harvesting

Kleine Ernte – großer Nutzen

Teil 1



Schon immer hat der Mensch versucht, seinem Umfeld Energie zur eigenen Nutzung zu entziehen. Man denke an Wasser- oder Windmühlen für die strömenden Medien Wasser und Luft zum Zerkleinern von Körnern, Walken von textilen Geweben sowie Antrieb von Schmiedehämmern, Eiskeller, in denen die winterliche Kälte zum Kühlen verderblicher Waren im Sommer konserviert wurde, Holz und Kohle als gespeicherte Sonnenenergie zum Heizen oder für technische Verfahren, in neuerer Zeit die über die Armbewegungen ihres Trägers aufgezugene Armbanduhr und vieles mehr.



Energy Harvesting  
Multi-Source Demoboard,  
Linear Technology

Bereits 1880 konstruierte der österreichische Ingenieur Friedrich Ritter von Lössl (1817–1907) eine durch atmosphärische Luftdruckschwankungen aufgezoene „autodynamische“ Uhr.

Legendär ist die Atmos-Uhr der französischen Uhrenmanufaktur Jaeger-LeCoultre, die 1930 erstmals auf den Markt kam und heute noch als Replica (Bild 1) zu kaufen ist [1]. Sie arbeitet nach den Ideen von Jean-Léon Reutter (1899–1971), der 1928 einen ersten Prototypen schuf. Seine von ihm als „Atmosphärische Uhr“ bezeichnete Erfindung bezieht ihre Antriebsenergie aus einer mit Gas gefüllten Druckdose, die sich mit schwankender Umgebungstemperatur zusammenzieht oder ausdehnt. Nur ein Grad Temperaturunterschied genügt für einen Gang der Uhr von 48 Stunden. Für den Antrieb einer Atmos-Uhr ist nur die enorm geringe Leistung von etwa einem Viertel Mikrowatt erforderlich. Eine genaue Beschreibung dieses mechanischen Wunderwerks wurde bereits im ELVjournal 3/2003 vorgestellt ([www.elv.de](http://www.elv.de): Webcode #1290).

Heute, nach dem Siegeszug von Elektrizität und Elektronik, unterstützt durch den Trend zu immer energieeffizienteren elektronischen Halbleiterchips und darauf aufbauenden technischen Systemen, besteht der zunehmende Wunsch, diese autark zu betreiben, d. h. nicht leitungsgebunden oder mit nachzuladenden Stromspeichern sowie gegebenenfalls drahtlos mit anderen Systemen kommunizierend. Das erhöht die Flexibilität und Zuverlässigkeit im Einsatz und kann erhebliche Kosten sparen bei Errichtung, Betrieb und Wartung. Die notwendige Betriebsenergie zur Realisierung derartiger Konzepte soll dem Umfeld des Geräts entnommen werden. Bei einer großen Verbreitung kann durch Einsparung von Rohstoffen und Energie ein signifikanter Nachhaltigkeitsbeitrag für die Welt von morgen geliefert werden. Bei einem geschätzten Anteil von 90 % für Verdrahtung und Installation einer Temperaturmessstelle in der Prozessautomatisierung wird deutlich, dass über Energy-Harvesting betriebene und drahtlos ausgelesene Sensoren nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich attraktiv sind. Eine äußerst umfassende Darstellung der Vielzahl von Möglichkeiten bietet Achmed Khammas in seinem „Buch der Synergie“, Teil C: „Micro-Energy-Harvesting“ [2].

**Micro-Energy-Harvesting für Ultra-Low-Power-Elektronik.** Es gibt zahlreiche Methoden zum Gewinnen von elektrischer Energie aus der Umwelt (Energy-Harvesting = Energie-Ernte). Sie bedienen sich un-



Bild 1: Temperaturschwankungen der Umwelt wandelt dieses Meisterstück der Mechanik von Jaeger-LeCoultre (Atmos Réédition 1930) in Druckschwankungen, die zum Antrieb dienen.  
Quelle: Jaeger-LeCoultre

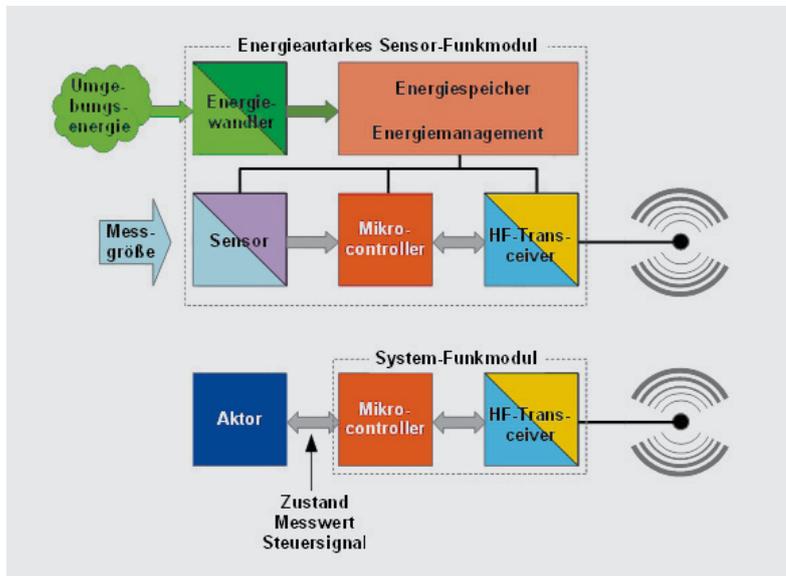


Bild 2: Drahtlose energieautarke Funkmodule beziehen ihre Betriebsenergie aus ihrem Umfeld. Das ermöglicht wegen des Verzichtes auf Batterien und Verkabelung hoch zuverlässige und flexible Sensornetze.

genutzter Energiepotentiale in unserer Umwelt: Wärme, Temperatur, Druck, Vibrationen, Lärm, Strahlung ... Die allermeisten von ihnen sind nicht geeignet, größere Energiemengen zu „ernten“ und Großverbraucher damit zu versorgen oder in das öffentliche Stromnetz einzuspeisen. Fast ausnahmslos liefern Micro-Energy-Harvesting-Verfahren kleine bis winzige Erträge, was die Notwendigkeit von Technologien mit extrem geringem Betriebsenergiebedarf voraussetzt. Ziel ist die netzunabhängige, drahtlose Versorgung kleiner elektronischer Systeme – einzeln oder funkvernetzt. Für mobile und regenerative Anwendungen bedingen sich Micro-Energy-Harvesting und Ultra-Low-Power-Anwendungen gegenseitig.

Insbesondere in flexiblen, dynamisch anpassbaren, verteilten, funkvernetzten Mikrosystemen ist die zuverlässige drahtlose Versorgung dezentraler Systemknoten mit elektrischer Energie wünschenswert. Im Prinzip bestehen solche Funknetze aus energieautarken Sensor-Funkmodulen und System-Funkmodulen. Die Aufgabe der Sensor-Funkmodule ist es, eine bestimmte physikalische Größe zu ermitteln und das Ergebnis per Funk an eine weiterverarbeitende Stelle zu übertragen, im Beispiel von Bild 2 ein System-Funkmodul, das über einen Aktor auf das gemeldete Sensorsignal reagiert. Bei geringem Energiebedarf des Aktors kann auch das System-Funkmodul autark, das heißt mit Energy-Harvesting, ausgeführt sein.

**Energieabschätzung.** Die Tatsache, dass nur geringe Energiemengen im Mikrowattsekundenbereich durch miniaturisierte Energy-Harvesting-

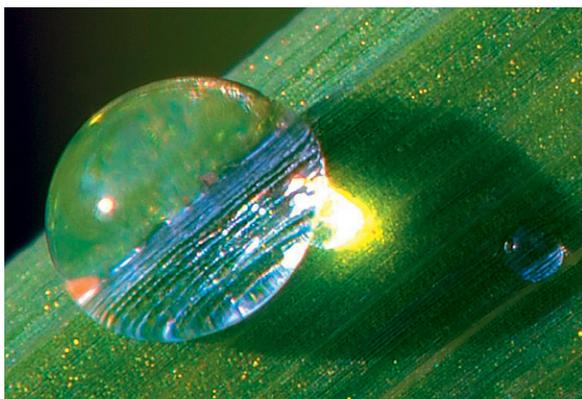


Bild 3: Das Abkühlen eines Wassertropfens um 1 °C liefert genug Energie, um Tausende von EnOcean-Funktelegrammen abzusetzen. Quelle: Wikipedia

Module gewonnen werden können, erfordert zwingend, dass die damit versorgte Elektronik einerseits extrem stromsparend ist und andererseits ihre Aufgabe nicht zu häufig und dann in möglichst kurzen Zeitabschnitten erledigen muss. Nach Angaben von EnOcean, Pionier der batterielosen Funktechnologie [3], benötigt ein typisches EnOcean-Funkmodul lediglich 50 µWs für die Übertragung eines Datensignaltelegramms über eine Entfernung von 300 m im Freifeld. Das wird plausibel, wenn man bedenkt, dass der komplette Auslösung, Durchführung und Übertragung umfassende Vorgang nur etwa eine Tausendstel Sekunde dauert.

Man spricht hierbei von einer gepulsten Übertragung, für deren Dauer von 1 ms eine Leistung von etwa 50 mW zur Verfügung stehen muss. Um diesen geringen Energiebedarf zu veranschaulichen: Das Abkühlen eines 0,1 g schweren Wassertropfens (Bild 3) um 1 °C setzt Energie für 25.000 EnOcean-Funk-Datentelegramme frei!

Wie Bild 4 zeigt, muss die Fläche unter der Zeit-Leistungs-Kurve so klein wie möglich sein, denn sie ist als Produkt aus Leistung und Zeit die verbrauchte Energie. Mit anderen Worten, für einen möglichst geringen Energieverbrauch  $E$  sind sowohl die Leistung  $P$  als auch deren Dauer der Inanspruchnahme  $T$  zu minimieren.

**Arten der Energiegewinnung.** Bei der Gewinnung von Energie für einen Verbraucher aus seinem Umfeld muss dessen Energiezustand zeitlichen oder örtlichen Änderungen unterworfen sein. An den Wandlertypen für die folgenden Energiearten sei dies erläutert:

**Mechanische Energie.** Hier kann man zwischen Rotationswandlern (auf Induktion basierende Mikrogeneratoren für Gas- und Wasserzähler, rotierende Werkzeuge, Autoreifen ...), Vibrationswandlern (Piezoelemente an Maschinen, Fahrzeugen, Menschen in Bewegung ...) und Linearwandlern (induktive oder piezoelektrische Generatoren für Taster ...) unterscheiden. Aus der Vielzahl von Möglichkeiten seien nachstehend nur einige exemplarisch herausgegriffen.

**Direkter Piezoeffekt.** Piezokristalle besitzen mindestens eine polare Achse. Bei Ausübung einer Kraft auf den Kristall in Polarisationsrichtung verformt sich dieser und die Schwerpunkte der positiven und

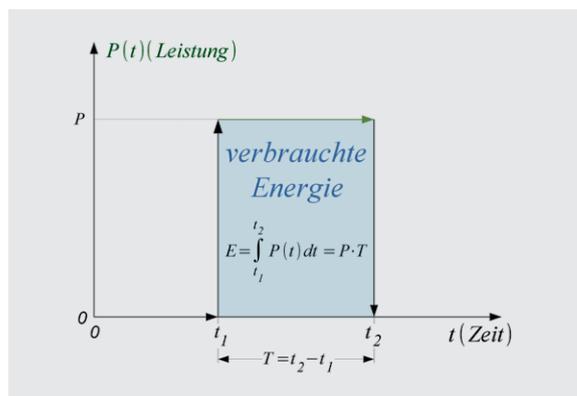


Bild 4: Um den Energieverbrauch zu minimieren, kann man bei der Aufnahme der Leistung und der Dauer der Inanspruchnahme ansetzen.

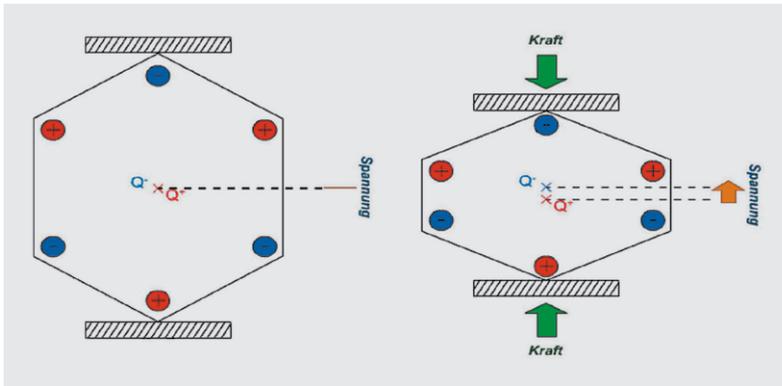


Bild 5: Die gerichtete Verformung eines piezoelektrischen Materials in Richtung der Polarisationsachse erzeugt mikroskopische Dipole infolge einer Verschiebung der Ladungsschwerpunkte innerhalb der Elementarzellen.

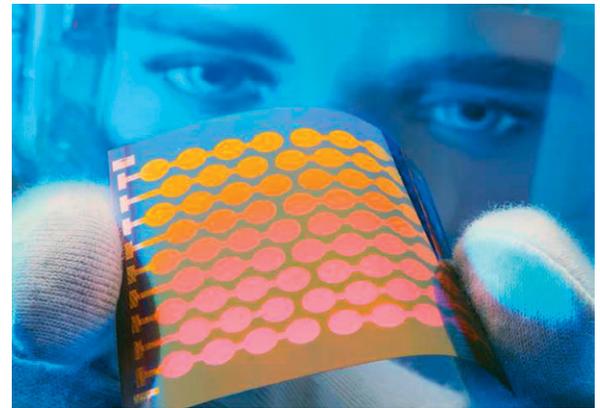


Bild 6: Einlamierte Dünnschicht-PZT-Schichten sind die Grundlage von Biegewandlern.

negativen Ladungen decken sich nicht mehr. Dadurch wird die Ladungsneutralität aufgehoben und es entsteht eine Polarisationsspannung (Bild 5).

Dieser Effekt ist reversibel, d. h. bei Anlegen einer Spannung verformt sich der Piezokristall in Richtung seiner Polarisationsrichtung. Industriell hergestellte Piezoelemente verwenden heute Keramiken (PZT: Blei-Zirkonat-Titanat). Details kann man unter [4] erfahren.

Damit sind piezoelektrische Materialien gleichermaßen für die Herstellung von Sensoren und Aktoren geeignet. Freilich sind die generierten Spannungen oder Krafthübe wegen der schwachen Verformbarkeit des Keramikmaterials (0,1–0,2 %) gering. Inzwischen gibt es aber viele Konstruktionsvarianten, von denen Biegewandler (Bild 6) und Stapelaktoren am häufigsten anzutreffen sind.

Im Prinzip ist Energy-Harvesting aus Linearbewegungen (z. B. ein Tastendruck) oder Umgebungsschwingungen (z. B. Motorvibrationen) einfach (Bild 7). Aber die geernteten Ladungsmengen sind klein und fallen meist nicht kontinuierlich an. Deshalb ist eine Elektronik erforderlich, die eine für den Betrieb des Ultra-Low-Power-Verbrauchers (z. B. ein Sensor-Funkknoten in einem Sensornetzwerk) hinreichend stabile Versorgung gewährleistet. Die Firma PI Ceramic, Spezialist für piezoelektrische Nanopositioniersysteme [5], hat ein Evaluierungsset E-821.EHD mit dem DuraAct Piezowandler P 876 mit Energiemodul E 821 für eine Ausgangsspannung zwischen 1,8 und 5 V im Angebot (Bild 8). Für 80 ms ist das System in der Lage, beachtliche 100 mW Leistung bereitzustellen.

Eine interessante Anwendung piezoelektrischer Wandler findet man im BMBF-geförderten Projekt PiezoEN zur ständigen Überwachung der Stabilität von Straßenbrücken. Ziel des Structural Health Monitoring (SHM) genannten Verfahrens ist es, frühzeitig Signale für eine Verschlechterung des baulichen Zustands eines Brückenbauwerks zu erhalten (Bild 9). Insbesondere Stahl- und Spannbetonkonstruktionen aus den 1960er und 1970er Jahren nähern sich allmählich ihrem Lebensende und erfordern aus Sicherheitsgründen eine andauernde Beobachtung.

In einer derartigen Anwendung kommen alle Vorteile eines autarken funkbasierten Sensornetzwerks zum Tragen, denn sehr häufig steht am Brückenstandort keine Strom zur Verfügung und die Anbringungsorte der Sensoren machen eine Leitungsverlegung zur Versorgung der Sensoren und Kommunikation mit ihnen extrem aufwändig. Hier ist ein Funknetz, bestehend aus Low-Power-Sensoren mit Energy-Harvesting aus den Vibrationen der Brücke, eine zuverlässige Alternative. In einer Pilotinstallation an der A3-Mainbrücke bei Dettelbach bewies das Konzept seine Wirksamkeit. Zum Einsatz kommen Piezomaterialien, welche die dreidimensionalen Strukturschwingungen (Eigenfrequenz 2,25 Hz) sowohl sensorisch erfassen als auch zur Gewinnung der für den Betrieb der Sensorknoten erforderlichen elektrischen Energie nutzen (Bild 10). Die Ausgangsleistung der Piezogeneratoren beträgt 0,3 mW. Das reicht aus, um alle zwei Sekunden ein Funktelegramm abzusetzen.

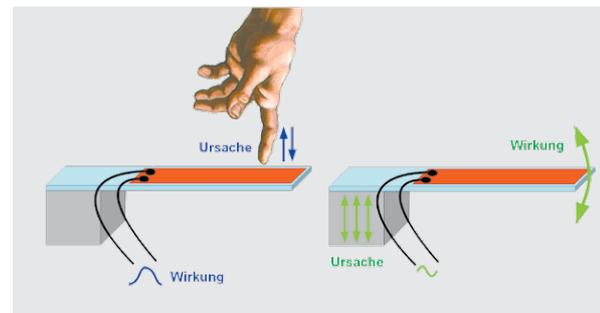


Bild 7: Die Verformung eines Biegewandlers durch einen Fingerdruck liefert einen proportionalen Spannungsimpuls. Vibrationen bewirken das Schwingen des Wandlers und erzeugen eine Wechselspannung.



Bild 8: Ein Experimentier- und Evaluationskit von PI Ceramic erlaubt die aufwandsarme Integration eines Biegewandlers in die vorgesehene Applikation.

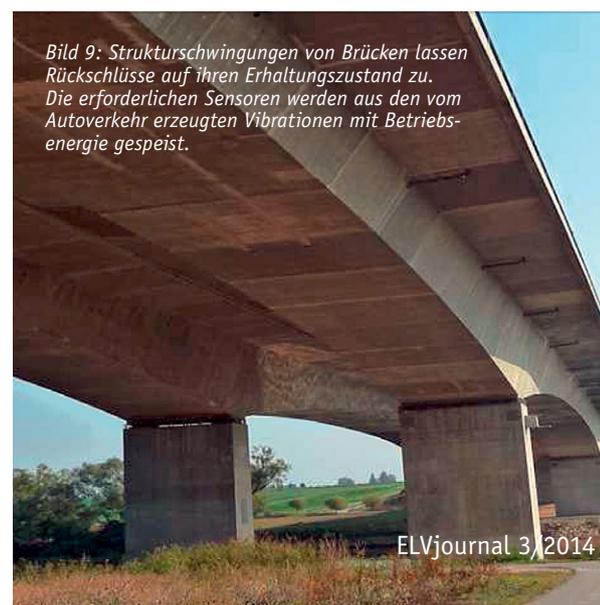


Bild 9: Strukturschwingungen von Brücken lassen Rückschlüsse auf ihren Erhaltungszustand zu. Die erforderlichen Sensoren werden aus den vom Autoverkehr erzeugten Vibrationen mit Betriebsenergie gespeist.

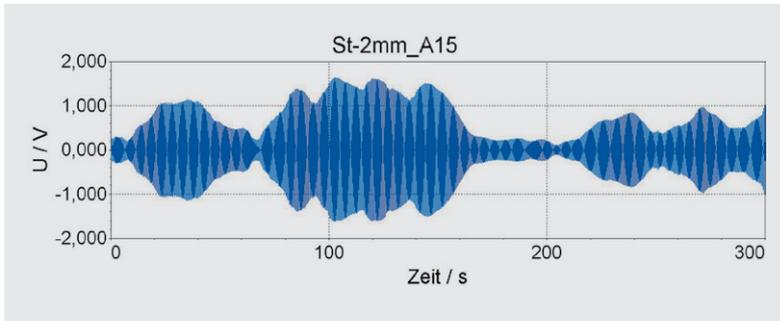


Bild 10: Typischer Schwingungsverlauf an der A3-Spannbeton-Mainbrücke bei Dettelbach



Bild 11: Mit dem Projekt Pelamis soll im großen Maßstab Energie aus den Wellenbewegungen an der Oberfläche der See geerntet werden.

Für das Ernten großer Energiemengen aus der Umwelt sei das Wellenenergieprojekt „Pelamis“ des EMEC (European Marine Energy Centre) vor den britischen Orkneyinseln genannt (Bild 11). Der Prototyp, eine 180 m lange „Seeschlange“, ist für die Gewinnung von bis zu 750 kW elektrischer Leistung ausgelegt. Bei erfolgreichem Probetrieb und nachfolgend entsprechendem Ausbau könnten hier bis 2020 bis zu 2 GW Strom aus Wellen- und Gezeitenkraft „geerntet“ werden, genug für 1,4 Millionen Haushalte.

**Thermische Energie.** Moderne thermoelektrische Generatoren (TEG) sind Festkörperbausteine ohne bewegliche Teile. Das Wirkprinzip beruht auf dem Seebeck-Effekt. Sein Entdecker war der deutsch-baltische Physiker Thomas Seebeck (1770–1831), der 1821 feststellte, dass an den Kontaktstellen zweier unterschiedlicher elektrischer Leiter, die sich auf unterschiedlichen Temperaturen befinden, eine Spannung (Thermospannung) auftritt (Bild 12). Wenn an den Verbindungsstellen der Leitermetalle A und B (meist verschweißt) die Wärmtemperatur  $T_w$  und die Kalttemperatur  $T_k$  herrschen, ist mit dem Voltmeter eine Spannung  $U$  zu messen. Sie hängt von den Metallen A und B und der Temperaturdifferenz  $T_w - T_k$  ab (Gleichung 1). Das Integral rührt daher, dass der Seebeck-Koeffizient  $S(T)$  gemessen in V/K von der Temperatur abhängt. Beim

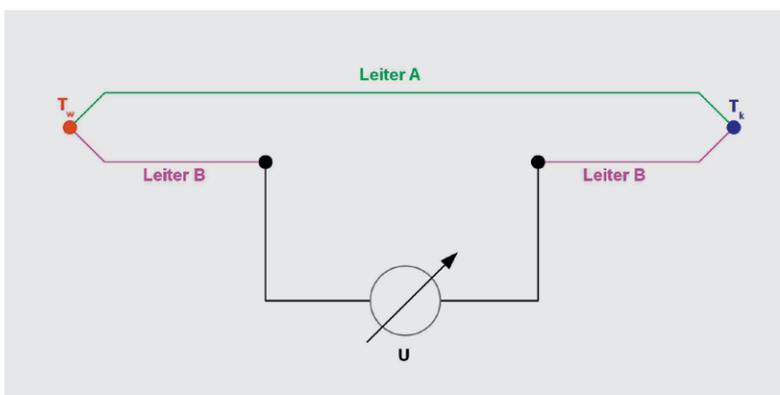


Bild 12: Der Seebeck-Effekt ist die physikalische Grundlage von thermoelektrischen Generatoren.

Metallpaar Konstantan-Kupfer tritt eine Spannung von 4,1 mV/100 K auf. Der Effekt lässt sich mit den Methoden der Festkörpertheorie erklären, Stichwörter sind Fermi-Energie und Austrittsarbeit.

$$U = \int_{T_k}^{T_w} (S_B(T) - S_A(T)) dT \approx (S_B - S_A) \cdot (T_w - T_k) \quad \text{Gleichung 1}$$

Das Ungefähr-Zeichen ( $\approx$ ) gilt für kleine Temperaturdifferenzen, bei denen die Seebeck-Koeffizienten  $S_A$  und  $S_B$  als näherungsweise konstant angenommen werden.

Mit Platin als Referenzmaterial sind die Spannungswerte für zahlreiche zweite Metalle in der sogenannten „thermoelektrischen Spannungsreihe“ zusammengefasst.

Erheblich bessere Ausbeuten erzielt man bei Verwendung von Elementen mit je einem p- und einem n-leitenden Schenkel aus entsprechend p- und n-dotierten säulenförmigen Halbleitermaterialien. Die Elemente werden elektrisch in Reihe und thermisch parallel geschaltet (Bild 13). In jeder Säule wandern die Ladungsträger (Löcher und Elektronen) in Richtung des Wärmestroms, also von der warmen zur kalten Seite. Der elektrische Gleichstrom durch die Last fließt nacheinander durch alle Säulen.

Je höher die Temperaturdifferenz zwischen der warmen und der kalten Seite eines TEGs ist, desto größer ist die Ausbeute an elektrischer Energie. Die Temperatur der kalten Seite lässt sich durch einen Kühlkörper in Richtung Umgebungstemperatur senken (Bild 14). Aus dem Ersatzschaltbild der Anordnung (analog zum elektrischen Strom, Bild 15) kann man ableiten, dass die für die Energiegewinnung relevante Temperaturdifferenz  $\Delta T_{TEG}$  zwischen beiden Seiten des TEGs umso größer ist, je kleiner der thermische Widerstand des Kühlkörpers  $R_{th-KK}$  ist (Gleichung 2). Mit anderen Worten: Je größer der Kühlkörper, umso mehr elektrische Leistung kann der TEG bereitstellen.

$$Q = \frac{T_{\text{heiß}} - T_{\text{kalt}}}{R_{th-TEG} + R_{th-KK}} \quad \text{Gleichung 2}$$

$$\Delta T_{TEG} = Q \cdot R_{th-TEG} = \frac{T_{\text{heiß}} - T_{\text{kalt}}}{R_{th-TEG} + R_{th-KK}} \cdot R_{th-TEG}$$

Zwar ist der Wirkungsgrad derartiger TEGs mit etwa 1 % recht niedrig, dennoch ist deren Zuverlässigkeit

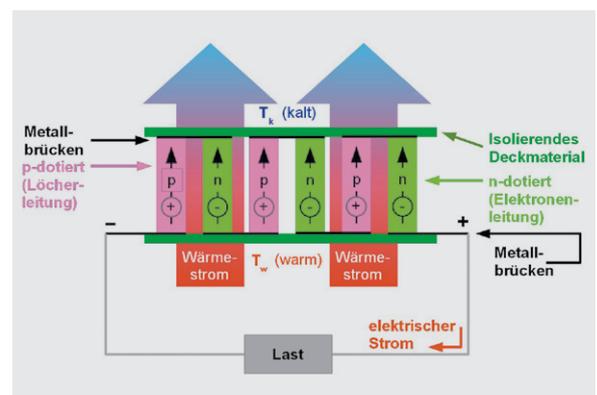


Bild 13: TEGs aus Halbleitermaterialien bestehen aus in Reihe geschalteten Elementarzellen.

