

Prototyp eines piezoelektrischen Energy Harvesters zur Umwandlung menschlicher Bewegungsenergie für die Versorgung von Wearables

B. Keune¹, M. Delle¹, C. Dirks¹, N. Boushaba¹, D. Brakensiek¹, A. Möller¹

¹THGA, Herner Str. 45, 44787 Bochum, Deutschland

Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt den technischen Entwicklungsprozess und -fortschritt eines eigenen Prototyps zum Energy Harvesting menschlicher Bewegungsenergie für Lehr- und Forschungszwecke an der Technischen Hochschule Georg Agricola detailliert dar. Der Prototyp besteht aus piezoelektrischen Biegewandlern als elektrische Energiequelle, einer Power-Management-Platine zur Energieformung und Steuerung der Energieflüsse sowie einem Lithium-Ionen-Akkumulator als elektrochemischen Energiespeicher. Die Power-Management-Platine ist als Aufsteckplatine für einen Mikrocontroller vom Typ ESP32-C3-Mini-1 gestaltet. Die inneren Zustandsgrößen des Harvesters werden über den Mikrocontroller drahtlos per Bluetooth-Low-Energy versendet und an zentraler Stelle ausgewertet. Die funktionierende Wirkungskette des piezoelektrischen Energy Harvesters kann auf diese Weise experimentell nachgewiesen werden. Dabei zeichnet sich insbesondere die eigens entwickelte Power-Management-Platine durch ihre Effizienz aus. Schwächen des Prototyps zeigen sich noch in dem geringen Energieertrag der verwendeten piezoelektrischen Wandler sowie in dem relativ hohen Energiebedarf des Mikrocontrollers zum Versenden von Status-Nachrichten per Bluetooth.

Keywords: Bewegungsenergie, Energy Harvesting, piezoelektrischer Wandler, Wearables

Motivation – Was sind Wearables?

Als Alltagsgegenstände genutzte, tragbare elektronische Geräte wie Smartwatches und Fitnesstracker werden als sogenannte Wearables bezeichnet, vgl. Abb. 1.



Abb. 1: Beispiel-Produktabbildungen von Wearables (Bildquelle: Onlineversandhändler)

Moderne Wearables können über eine Reihe technischer Funktionen in den übergeordneten Kernfunktionen Konnektivität, Sicherheit, Gesundheits- und Fitnesstracking sowie Entertainment verfügen. Dazu zählen die Anzeige von Benachrichtigungen, WLAN für Fernupdates, GPS zur Navigation, NFC für kontaktloses Bezahlen, Sturzerkennung mittels Beschleunigungsmesser und Gyroskop, NotrufFunktionen, das Zählen von Schritten, Herzfrequenzmessung, Schlafanalyse und das Erstellen von EKGs. Immer neue technische Funktionen wie Sprachassistenten für eine komfortablere Bedienung und die Integration in alltägliche Geschäftsprozesse führen zu einer

steigenden Durchdringung von Wearables innerhalb der Gesellschaft. Ebenso wächst mit der zunehmenden Verbreitung solcher Geräte ihre Bedeutung in der individuellen Leistungsoptimierung und Gesundheitsüberwachung [1]. Wearables entwickeln sich somit zum unverzichtbaren Werkzeug im Alltag und zu einer treibenden Kraft technologischer Entwicklung.

Ihren Erfolg verdanken Wearables vor allem ihrem praktischen Nutzen und weitestgehend ihrer Gestaltung als mobile Endgeräte mit hohem Tragekomfort am menschlichen Körper, sei es als Armband oder Sonnenbrille. Prognosen erwarten, dass dieser Trend auch in Zukunft anhält. Denn der Mensch als mobiles Wesen verlangt nach effektiven Werkzeugen, um die technischen Möglichkeiten der Mobilität auszuschöpfen. Aus sozioökonomischer Perspektive umfasst der Begriff Mobilität sowohl die physische Bewegung im Raum als auch den sozialen Auf- oder Abstieg in der Gesellschaft. So wird die räumliche Erreichbarkeit von Bildung, Arbeit, Gesundheitswesen und finanziellen Mitteln als Schlüssel zur gesellschaftlichen Teilhabe und ein wesentliches volkswirtschaftliches Potential zur Produktivitätssteigerung betrachtet.

Ziel – Energy Harvesting für Wearables

Neben den bereits im Alltag etablierten Wearables erreichen daher immer neue Ideen aus Forschung und Entwicklung die Schwelle zur Praxis- und Alltagstauglichkeit, vgl. Abb. 2.

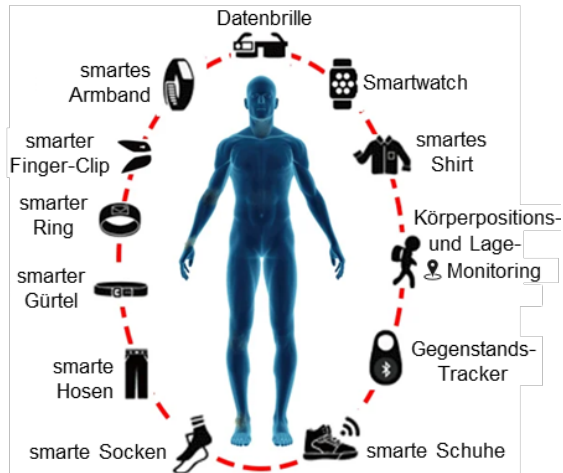


Abb. 2: Illustrative Darstellung von Wearable-Technologien [2] (Text vom Englischen ins Deutsche übersetzt)

Als elektronische Geräte hängt das Funktionieren von Wearables insbesondere von einer zuverlässigen und stabilen Energieversorgung ab. Dazu verfügen sie über elektrochemische Energiespeicher, vor allem Lithium-Ionen-Akkus mit typischen Kapazitäten zwischen 150mAh und 475mAh. Je nach Anwendung bedeutet das eine Laufzeit von 6 bis 30 Stunden. Durch Alterungsprozesse und abhängig vom individuellen Nutzungsverhalten kann diese durchschnittliche Gerätelauzeit deutlich sinken. Über geeignete Schnittstellen lassen sich Wearables bzw. ihre Energiespeicher bequem aufladen. Dies kann sowohl drahtgebunden passieren, z.B. über USB-C, oder drahtlos über den Qi-Standard. Wohingegen Wearables als mobile Geräte ausgestaltet sind, stammt die elektrische Energie dafür jedoch in der Regel aus einem stationären elektrischen Stromverteilnetz. In dicht besiedelten, urbanen Gebieten verfügt dieses Stromnetz flächendeckend über Netzanchluss- bzw. Ladepunkte. Immer häufiger finden sich auch Lademöglichkeiten an öffentlichen Plätzen in Form von Solarbänken und Straßenlaternen. Ziel solcher kommunaler Initiativen besteht darin, die Aufenthaltsqualität in öffentlichen Bereichen zu verbessern und gleichzeitig eine moderne Infrastruktur zu schaffen, die es ermöglicht, mobile Endgeräte möglichst bequem vor Ort aufzuladen. In dünn besiedelten, ländlichen Gebieten mit einer weniger gut ausgebauten

Infrastruktur, lassen sich Wearables durch tragbare Solarpaneele, Kurbelgeneratoren oder auch per Powerbank aufladen.

Diese praktischen Lösungen stehen jedoch den wesentlichen Vorteilen von Wearables als leichtgewichtige, mobile Endgeräte entgegen. Denn entweder muss zum Aufladen des Wearables eine verfügbarer Ladepunkt in der Umgebung verfügbar sein oder es müssen Hilfsmittel transportiert werden, die keinen vergleichbaren Tragekomfort bieten, deutlich schwerer wiegen oder selbst nur eine begrenzte Energiemenge bieten. Stattdessen werden unmittelbar am Träger verfügbare, leichtgewichtige Lösungen mit kontinuierlicher Ladefähigkeit benötigt, um längere Gerätelauzeiten von Wearables bei gleichzeitig hohem Trägerkomfort zu erreichen. Mit dieser Zielsetzung werden die technischen Einsatzmöglichkeiten von Energy Harvesting erforscht und stetig weiterentwickelt [3]. Energy Harvesting bezeichnet die Gewinnung typischerweise eher kleiner, in unmittelbarer Umgebung zum Endverbraucher verfügbarer Energiemengen, zum Beispiel aus Strahlung, Wärme oder Vibration. Quellen für Energy Harvesting sind thermische, kinetische und triboelektrische Energie, aber auch Solarenergie sowie elektromagnetische Energie aus hochfrequenten Feldern [4]. Theoretische und praktische Untersuchungen zeigen, dass der Mensch selbst als mögliche Energiequelle für Wearables ein beachtliches Ertragspotential bietet [5], vgl. Abb. 3.

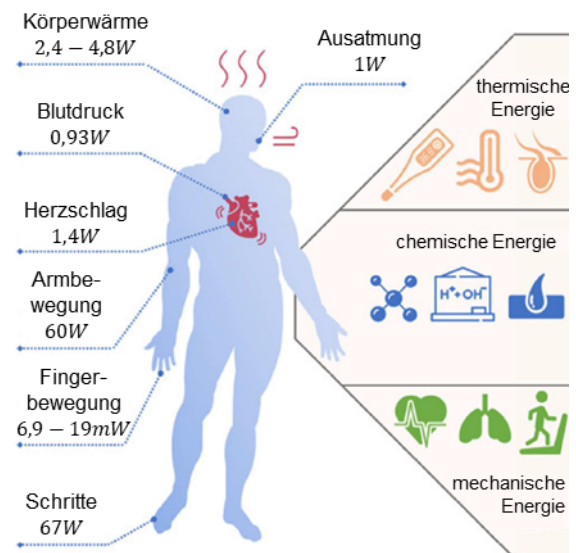


Abb. 3: Energieertragspotential Mensch [5] (Text vom Englischen ins Deutsche übersetzt)

Konzept – Schrittennergie nutzen

Insbesondere menschliche Bewegungsenergie bietet laut wissenschaftlicher Studien ein

ausreichendes Ertragspotential zur Energieversorgung von Wearables mittels Energy Harvesting [5]. Diese Energie kann über geeignete Energiewandler während des Gehens gewonnen, gespeichert und genutzt werden. Zur Energiewandlung können verschiedene Prinzipien Anwendung finden. Beim Induktionsprinzip wird eine elektrische Spannung aufgrund der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses durch eine Leiterschleife induziert. Bei der Energiewandlung mittels des piezoelektrischen Effekts wird hingegen die Eigenschaft bestimmter Werkstoffe ausgenutzt, bei ihrer Verformung durch äußere Krafteinwirkung einen elektrischen Strom treiben zu können. Vorteilhaft ist, dass sich die Bauformen piezoelektrischer Wandler relativ gut in Schuhwerk integrieren lassen, um dadurch die Bodenreaktionskräfte menschlicher Schrittenergie zu nutzen.

Bodenreaktionskräfte sind jene Kräfte, die der Boden gemäß dem dritten Newtonschen Axiom als Reaktion auf eine vom Menschen beim Gehen oder Laufen ausgeübte Kraft entgegengesetzt aufbringt. In der Biomechanik und Ganganalyse werden Bodenreaktionskräfte in drei Dimensionen gemessen: vertikal, vor/zurück und lateral. Beim Gehen entsteht für die vertikale Bodenreaktionskraft ein charakteristischer zweigipfliger Kurvenverlauf, vgl. Abb. 4.

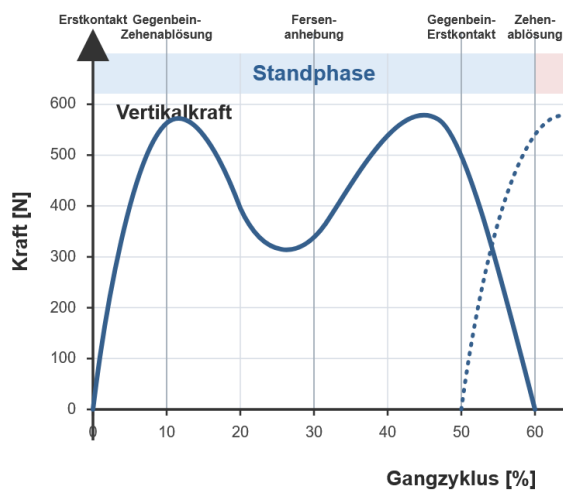


Abb. 4: Vertikale Bodenreaktionskraft über den Gangzyklus für ein Bein basierend auf [6]

Der erste Spitzenwert eines Gangzyklus tritt kurz nach dem Fersenkontakt auf und liegt oft über dem eigentlichen Körpergewicht. Die zweite Spitze entsteht am Ende der Standphase, wenn sich mit dem Vorfuß vom Boden abgestoßen wird. Zwischen diesen Spitzen befindet sich eine ausgeprägte Standphase. Dabei ist die Kraft geringer als

das Körpergewicht, da sich der Körperschwerpunkt über dem Fuß und dieser sich in der Abrollbewegung befindet. Ein typischer Gangzyklus beim Menschen wiederholt sich mit einer Frequenz von ca. zwei Hertz.

Das Butterworth-Van-Dyke-Ersatzschaltbild modelliert das elektrische Verhalten von piezoelektrischen Wandlern nahe ihrer Resonanzfrequenz, indem es das mechanische Schwingungsverhalten in rein elektrische Komponenten übersetzt. Für Schaltungssimulationen weit unterhalb der Resonanzfrequenz kann ein piezoelektrischer Wandler vereinfacht als Parallelschaltung aus Wechselstromquelle, Wirkwiderstand für dielektrische Verluste und statische Kapazität modelliert werden. Wird ein piezoelektrischer Biegewandler verformt, so entsteht durch die Verschiebung der Ladungsschwerpunkte im Kristallgitter eine elektrische Spannung. Bei einer periodischen Verformung biegt sich der Wandler abwechselnd nach oben und nach unten bzw. erfährt eine positive und negative Auslenkung. Dadurch wechselt das Vorzeichen der Ladungstrennung mit jedem Richtungswechsel und es entsteht eine Wechselspannung, die der Schwingungsfrequenz folgt. Dabei wechselt die Polarität in der Ausgangsspannung des Wandlers. Dieses Verhalten wird genutzt, um Vibrationen in elektrische Signale umzuwandeln. Je signifikanter die Verformung des piezoelektrischen Wandlers, desto größer seine erzeugte elektrische Spannung. Um aus einer solch fluktuierenden Energiequelle einen maximalen Leistungsertrag zu erzielen, wird ein effektives Power-Management benötigt. Dabei wird eine Optimierung der Leistungsabgabe durch Gleichrichtung der Quellspannung, Anpassung des Spannungslevels mittels Gleichstromsteller sowie durch ein effektives Maximum Power Point Tracking (MPPT) erreicht.

Die erreichbare Leistung aus solchen piezoelektrischen Energy Harvestern ist i.d.R. zu klein für einen kontinuierlichen Betrieb von typischen Wearables, sodass diese vielmehr aus einem Energiespeicher gespeist werden müssen. Um elektrische Energie zu speichern, eignen sich für mobile Anwendungen insbesondere Lithium-Ionen-Akkus aufgrund ihrer sehr hohen Energiedichte bei geringem Gewicht. Sie sind schnellladefähig, haben keinen Memory-Effekt und zeichnen sich durch eine geringe Selbstentladung sowie einer langen Lebensdauer mit vielen Ladezyklen aus. Dafür erfordern sie ein sicheres Batterielademanagement, um Überladung, Tiefenentladung oder Überhitzung zu

verhindern. Neben der zentralen MPPT-Funktionalität und dem Schutz des Energiespeichers, bestimmt das Power-Management die Leistungsflüsse zwischen Energiespeicher und dem elektrischen Verbraucher. Somit ergibt sich als Systemkonzept für einen Energy Harvester zur Umwandlung menschlicher Bewegungsenergie ein allgemeiner Aufbau bestehend aus drei zentralen Komponenten:

- (1) einer Zusammenschaltung piezoelektrischer Elemente als Energiewandler,
- (2) einer Power-Management-Platine zur effizienten Energieformung und Steuerung der Energieflüsse und
- (3) einem Akkumulator als elektrochemischer Energiespeicher.

Machbarkeitsnachweis – Prototyp

Ein Prototyp dient dem eigenen technischen Machbarkeitsnachweis eines piezoelektrischen Energy Harvesters zur Schrittenenergieumwandlung. Für Menschen typische Gangzyklen haben eine Schrittfrequenz von nur ein bis drei Hertz. Die Resonanzfrequenz des piezoelektrischen Wandlers sollte also möglichst niedrig sein. Gleichzeitig muss er der mechanischen Belastung durch die wirkenden Gewichts- bzw. Bodenreaktionskräfte standhalten. Als Energiequelle wurde daher der piezoelektrische Biegewandler S118-J1SS-1808YB verwendet. Wie üblich für Piezoelemente, besteht er aus einem Blei-Zirkonat-Titanat-Verbund. Tab. 1 zeigt seine wesentlichen Spezifikationen.

Tab. 1: Spezifikationen S118-J1SS-1808YB

Parameter	Wert
Resonanzfrequenz	130 Hz
Leerlaufspannung	± 6 V
Lastwiderstand	15,7 kOhm
Nennleistung	0,7 mW
Nennbeschleunigung	± 8 G's
Abmessungen (mm)	55,4 x 23,4 x 0,46
Gewicht	9,537 g

Da die Resonanzfrequenz des piezoelektrischen Wandlers immer noch deutlich über der Schrittfrequenz liegt, werden drei Biegewandler vom gleichen Typ miteinander parallel verschaltet, um eine ausreichend hohe, messbare Stromstärke zu erreichen. Ein per 3D-Drucker gefertigtes Gehäuse zur provisorischen Befestigung an einer Schuhspitze und gleichartiger Anregung der Biegewandler ist in Abb. 5 dargestellt.

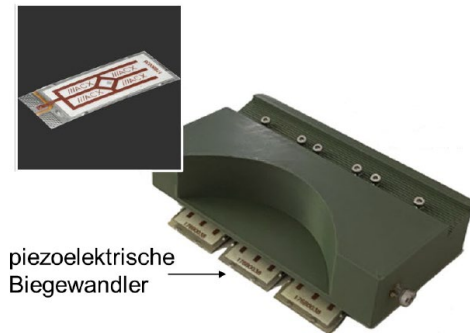


Abb. 5: Foto von S118-J1SS-1808YB

Für die Entwicklung der Power-Management-Platine wurde der PMIC AEM00330 von e-Peas ausgewählt. Der AEM00330 integriert effiziente Buck/Boost-Wandler anstelle verlustbehafteter LDOs (Low Dropout Regulatoren) und hat einen integrierten Shipping Mode, der es ermöglicht, den Ruhestrom des Systems im inaktiven Zustand auf ein Minimum zu reduzieren [7]. Buck/Boost-Wandler verändern die Spannung durch schnelles Schalten, wohingegen LDOs die überschüssige Energie an Widerständen in Wärme umwandeln. Somit eignet sich der AEM00330 besonders für kompakte und niedrigleistungsfähige Systeme wie drahtlose Sensorknoten. Neben der Lastversorgung übernimmt der IC auch wichtige Schutz- und Steuerfunktionen, um die Lebensdauer des Energiespeichers zu verlängern und den zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten. Darüber hinaus ist der IC für alle gängigen Typen elektrochemischer Energiespeicher geeignet und bietet eine passende Ladespannung. Der Chip integriert somit als zentraler Baustein wesentliche Funktionen der Platine. Dazu zählen

- ✓ Gleichspannungskonverter mit hohem Wirkungsgrad,
- ✓ Energiespeicherverwaltung,
- ✓ Maximum Power Point Tracking (MPPT),
- ✓ Ladeschutzmechanismen,
- ✓ Systemstart aus energielosem Zustand (Kaltstart).

Durch seine externe Beschaltung, kann der AEM00330 für verschiedene Anwendungsfälle, z.B. unterschiedliche Quellen und Lasten, konfiguriert werden. Um den Zustand des Energy Harvesters und insbesondere den Ladezustand (engl. SoC) des Energiespeichers zu monitorieren, wurde der AEM00330 als PMIC auf einer eigens entwickelten Platine inklusive Dioden-Gleichrichterschaltung eingesetzt. Diese ist als HAT, also als Aufstreckplatine, für den Mikrocontroller ESP32-C3-Mini gestaltet.

Dieser Mikrocontroller hat einen geringeren Energieverbrauch als z.B. die verwandte Entwicklungsplatine ESP32-Wroom und auch kleinere Abmessungen, verfügt jedoch über die gleichen Konnektivitätsmöglichkeiten per Bluetooth-Low-Energy (BLE). Der ESP32-C3-Mini basiert auf einer energieeffizienten 32-Bit-RISC-V-CPU und unterstützt verschiedener Low-Power-Betriebsmodi (Sleep, Deep-Sleep, Modem-Sleep). Dadurch kann die Stromaufnahme im Ruhezustand auf unter 5µA sinken. Dies ist entscheidend, um die durch das Piezoelement gewonnene, geringe Energiemenge möglichst effizient zu nutzen. Somit eignet sich der ausgesuchte Mikrocontroller im direkten Vergleich besser für die Anwendung im Energy Harvesting. Abb. 6 zeigt die fertige, mit KiCad designte Power-Management-Platine ohne und mit aufgestecktem Mikrocontroller [8].

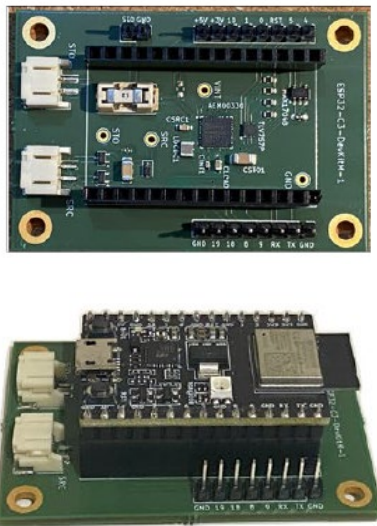


Abb. 6: Foto von Power-Management-Platine ohne und mit aufgestecktem ESP32-C3-MINI-1

Der AEM00330 startet im sogenannten Reset State, in dem alle internen Zustände zurückgesetzt sind und keine Spannungen anliegen. Sobald am Eingang der Power-Management-Platine durch den piezoelektrischen Biegewandler eine Eingangsspannung $V_{SRC} > 275\text{mV}$ sowie eine Eingangsleistung $P_{SRC} > 3\mu\text{W}$ erreicht werden, wechselt der AEM00330 in den Wake-Up State. Erreicht anschließend die interne Spannung VINT den Wert von 2,2V, ist der Cold Start abgeschlossen und der Chip befindet sich im Start State. Abhängig von der gesetzten Priorisierung (über den Pin STO PRIO) beginnt der AEM00330 nun, entweder primär den Speicher (STO) zu laden oder direkt die Last (LOAD) zu versorgen. Sobald beide Ausgänge die jeweils konfigurierten

Schwellenwerte erreicht haben, wechselt das System in den Supply State. Im Supply State steht der volle Funktionsumfang des Power-Managements zur Verfügung. Der AEM00330 kann nun dynamisch Energie zwischen Quelle, Speicher und Last verteilen, je nachdem, wo Energie verfügbar ist oder benötigt wird. Idealerweise befindet sich der Chip dauerhaft in dieser Phase, da sie einen stabilen und effizienten Betrieb des Gesamtsystems ermöglicht.

Zur Überwachung des Ladezustands und der Spannung des eingesetzten Lithium-Ionen-Akkus wird der Fuel Gauge MAX17048 von Analog Devices verwendet. Das Bauteil bietet eine Lösung zur Ladezustandserfassung mit minimalem Energieverbrauch und ist damit gut geeignet für energieeffiziente Systeme. Der MAX17048 übernimmt die Aufgabe, den SoC des Akkus zu berechnen und dessen Spannung kontinuierlich zu überwachen. Diese Informationen werden über seine I2C-Schnittstelle an den Mikrocontroller ESP32-C3-Mini übertragen. Die Verbindung erfolgt über das Aufstecken auf einer Stiftleiste. Als Energiespeicher wurde der Lithium-Ionen-Akku Samsung INR18650-25R mit einer Nennspannung von 3,6V, einer Kapazität von 2500mAh, einer max. Ladespannung von 4,2V, einem max. Ladestrom von 4A und einer Entladeschlussspannung von 2,5V verwendet. Verglichen mit dem Energieertrag des piezoelektrischen Wandlers ist der Energiespeicher überdimensioniert, erfüllt jedoch für erste Untersuchungen am Prototyp seinen Zweck.

Ergebnisse & Ausblick

Abb. 7 zeigt den Aufbau des Demonstrators bestehend aus parallel geschalteten, piezoelektrischen Biegewandlern, Power-Management-Platine mit aufgestecktem Mikrocontroller, angeschlossenen Batteriespeicher und einem weiteren Mikrocontroller vom Typ ESP32-Wroom mit OLED-Display als Datensinke und zur Anzeige per BLE empfangener Zustandsdaten.

Ein erster technischer Machbarkeitsnachweis der Wirkungskette des piezoelektrischen Energy Harvesters verlief erfolgreich. Durch wiederholtes Drücken und damit Anregung der Biegewandler, konnte eine ausreichend hohe Leistung für den Kaltstart der Power-Management-Platine erreicht werden. Ein Ladevorgang des Lithium-Ionen-Akkus konnte messtechnisch nachgewiesen werden.

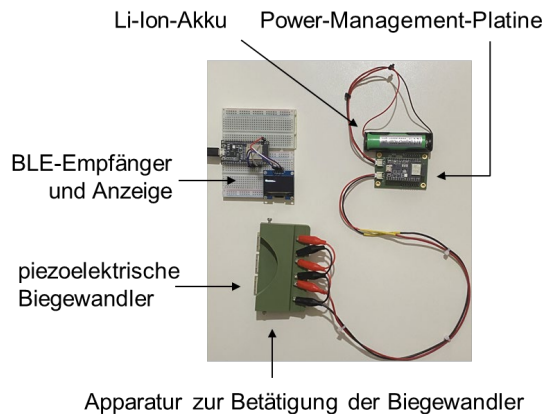


Abb. 7: piezoelektrischer Energy Harvester [8]

Die inneren Zustände, wie bspw. der SoC, wurden zyklisch auf dem OLED-Display aktualisiert. Der gewonnene Leistungsertrag konnte über weite Bereiche wiederholter Versuchsdurchführungen aufrecht erhalten bleiben. Jedoch war die Ladeleistung aus Ladespannung von 3,6V und einem Ladestrom am Akku mit 0,1mA noch sehr niedrig. Tatsächlich reichte diese nicht aus für eine nennenswerte Ladung des 2500mAh-Akkus. Darüber hinaus wurden bei der Versorgung der Last, also des Mikrocontrollers ESP32-C3-Mini, Stromspitzen von 60mA beim Versenden von BLE-Statusnachrichten registriert. Aus diesem Grund wurde der Akku vor Versuchsstart über ein Labornetzgerät mit Strombegrenzung aufgeladen. Mit dem erfolgreichen Kaltstart des Energy Harvesters bei Anregung der piezoelektrischen Energiewandler, konnte dieser die Last aus dem bereits aufgeladenen Akku speisen. Insgesamt ist der entwickelte Prototyp und Demonstrator-Aufbau unter der Maßgabe eines Rapid-Prototyping-Prozesses mit Nachweis der technischen Kernfunktionalität ein Erfolg. Jedoch gilt es für zukünftige Weiterentwicklungen dem noch relativ hohen Energiebedarf des Mikrocontrollers zur reinen Messdatenversendung und -protokollierung zu begegnen. Insbesondere bei der BLE-Kommunikation kann ein dedizierter BLE-Chip auf der Power-Management-Platine eine signifikante Energieeinsparung gegenüber einem HAT-Design mit ESP32-Mikrocontroller bedeuten. Ultra-Low-Power BLE-SoCs benötigen im Tiefschlaf oft nur wenige μA , ihre Spitzenströme beim Senden und Empfangen liegen typischerweise nur bei wenigen mA und damit deutlich unter den im Versuchsaufbau registrierten 60mA vom ESP32. Darüber hinaus ist der verwendete Lithium-Ionen-Akku im Vergleich mit typischen Kapazitäten von Wearables mit 2500mAh überdimensioniert, sodass sich gespeicherte Ladungen nicht

unmittelbar in einem höheren SoC widerspiegeln. Eine wesentliche Schwäche zeigt sich auch in dem Energieertrag, der mit einer erreichten Leistung im μW -Bereich zu niedrig für ein ausreichend schnelles Wiederaufladen des Akkus oder den Betrieb eines Wearable-Gerätes ist. Mit dem neu verfügbaren ePeas-PMIC AEM13921 lässt sich Energie aus zwei separaten Energiequellen gewinnen, sodass ein verbesserter piezoelektrischer Wandler kombiniert mit einem Solarmodul ein theoretisch ausreichendes Ertragspotential bieten kann. Und schließlich ist der Prototyp mit Gesamtkosten von ca. 100€ noch weit entfernt von einem wirtschaftlichen Use-Case.

Literatur

- [1] Liu, F., Cui, F., Tong, Y. et al. Research Progress on Human Body Energy Harvesting and Storage Systems for Wearable Electronic Devices. *J. Electron. Mater.* 54, 8103–8143 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11664-025-12232-8>
- [2] Rodrigues, J., Segundo, D., Junqueira, H., Sabino, M., Prince, R., Al-Muhtadi, J., de Albuquerque, V. Enabling Technologies for the Internet of Health Things. *IEEE Access* (2018) DOI 10.1109/ACCESS.2017.2789329.
- [3] Khalid, S., Raouf, I., Khan, A. et al. A Review of Human-Powered Energy Harvesting for Smart Electronics: Recent Progress and Challenges. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* 6, 821–851 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00144-y>
- [4] Spies, P., Pollak, M., Mateu, L. *Handbook of Energy Harvesting Power Supplies and Applications*. Verlag Pan Stanford Publishing Pte Ltd, 2015, ISBN-13: 978-9814241861.
- [5] Zou, Y., Bo, L., Li, Z. Recent progress in human body energy harvesting for smart bioelectronic system. *Fundamental Research*, Volume 1, Issue 3, 2021, Pages 364-382, ISSN 2667-3258, <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.05.002>.
- [6] Boushaba, N. (2025). Analyse und prototypische Entwicklung eines piezoelektrischen Energy Harvesters zur Schrittenenergieumwandlung. (unveröffentlichte Bachelorarbeit). THGA.
- [7] E-peas S.A. AEM00330: Photovoltaischer Konstantspannungs-Buck-Boost-Wandler mit DCDC-Ausgang. 2025. url: <https://e-peas.com/documents/AEM00330/DSAEM00330.pdf> (abgerufen am 03. 08. 2025).
- [8] Delle, M. (2025). Piezoelektrisches Energy Harvesting zur Versorgung eines leistungsarmen Mikrocontrollers - Design einer Leiterplatte mit integrierter Stromversorgungsschaltung zur Umwandlung von Bewegungsenergie in elektrische Energie (unveröffentlichte Bachelorarbeit). THGA.