

»GREEN ICT @ FMD« – KOMPETENZZENTRUM FÜR ÖKOLOGISCH NACHHALTIGE IKT

Ermittlung und Vergleich des CO₂-Fußabdrucks von energieautarken Sensorsystemen

Ein Whitepaper von "HUB 1 – Sensor-Edge-Cloud-Systeme"

Constantin Baumann (Fraunhofer IIS), Johannes Wieczorek (Fraunhofer IIS), Peter Spies (Fraunhofer IIS), David Sanchez (Fraunhofer IZM)



Dieses Whitepaper ist Teil des Projekts „Green ICT @ FMD“ – Kompetenzzentrum für ökologisch nachhaltige Informations- und Kommunikationstechnik. Das Projekt wird von der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) durchgeführt und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

Kompetenzzentrum »Green ICT @ FMD«

c/o Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland FMD
Anna-Louisa-Karsch-Str. 2
10178 Berlin, Deutschland

Ansprechperson
Peter Spies peter.spies@iis.fraunhofer.de

www.greenict.de
www.forschungsfabrik-mikroelektronik.de

Veröffentlicht:
19.03.2025

Einleitung

Eine Kernkomponente des Internet-der-Dinge sind drahtlose Sensoren, die Daten von verschiedensten Objekten sammeln, verarbeiten und weiterleiten. Aus diesen Daten werden Informationen gewonnen, die genutzt werden, um unterschiedlichste Maschinen, Anlagen und Prozesse zu optimieren. Das Ziel dabei ist neben einer Erhöhung von Sicherheit, Qualität, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit, meist auch die Verbesserung der Nachhaltigkeit. Da solche Sensoren oft in sehr großen Stückzahlen eingesetzt und damit produziert werden müssen, stellt sich aber immer die Frage, wie nachhaltig die eingesetzten Sensoren selbst sind.

Dieses Whitepaper beschreibt daher den CO₂-Fußabdruck der Produktion von drahtlosen Funksensoren. Es wird eine Vorgehensweise vorgestellt, die den CO₂-Fußabdruck der Produktion der einzelnen Bauteile dieser Funksensoren abschätzt. Als Beispiel dient ein drahtloser Sensorknoten zur Erfassung von Verbrauchswerten wie Wärme, elektrischer Energie oder Wasser. Dieser Sensor wird mit unterschiedlichen Leistungsverbräuchen und verschiedenen Energieversorgungen hinsichtlich seines CO₂-Fußabdrucks analysiert. Die Leistungsverbräuche ergeben sich dabei durch unterschiedliche Übertragungsraten des genutzten LPWAN-Funkmoduls.

Es wird im speziellen die Energieversorgung über eine Primärbatterie und über Energy Harvesting aus Licht und Temperaturdifferenz untersucht und der Einfluss von Laufzeit, Leistungsbedarf und Umgebungsbedingungen auf den CO₂-Fußabdruck der unterschiedlichen Energieversorgungen abgeschätzt. Die Umgebungsbedingungen sind dabei die nutzbare Temperaturdifferenz für die Versorgung des Sensors mittels thermoelektrischer Wandler beziehungsweise die Beleuchtungsstärke zur Energiegewinnung über Solarzellen. Hierzu wird die Batterie entsprechend des Leistungsbedarfs des Sensorknotens für eine Betriebszeit von 10 Jahren ausgelegt und die Energy Harvester werden entsprechend der Umgebungsbedingungen und des Leistungsbedarfs des Sensorknotens dimensioniert. Schließlich wird der CO₂-Fußabdruck der verschiedenen Realisierungen ermittelt und in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen weiter untersucht.

1. Energieverbrauch des Sensorknotens in Abhängigkeit des Nutzungsprofil

Drahtlose Sensoren benötigen elektrische Energie für ihren Betrieb. Um eine einfache Installation und einen Einsatz an Stellen ohne kabelbasierte Stromversorgungen zu ermöglichen, wird diese Energie typischerweise durch Batterien bereitgestellt. Die Zeitdauer bis zum Wiederaufladen oder Auswechseln solcher Batterien ist maßgeblich vom Energieverbrauch des Sensorknotens abhängig. Dieser wiederum hängt stark von der Aktivität und damit dem Nutzungsprofil des Sensorknotens ab.

Alternativ können drahtlose Sensoren auch über Energy Harvesting mit Energie aus der direkten Umgebung des Sensorknotens versorgt werden. Beispiele für solche Energieformen in der Umgebung sind Licht, Temperaturdifferenzen, Verformungen oder Vibrationen. Hier sind die Größe des benötigten Energy Harvesting Systems abhängig vom Energieverbrauch des Sensorknotens und der Menge an Umgebungsenergie.

Als Beispiel soll ein Sensorknoten zur Erfassung von Verbrauchswerten wie Wärme, elektrischer Energie oder Wasser dienen. In **Abbildung 1** sind die Komponenten des betrachteten Systems dargestellt. In gelb, blau und orange jeweils die unterschiedlichen Komponenten der Energieversorgung.

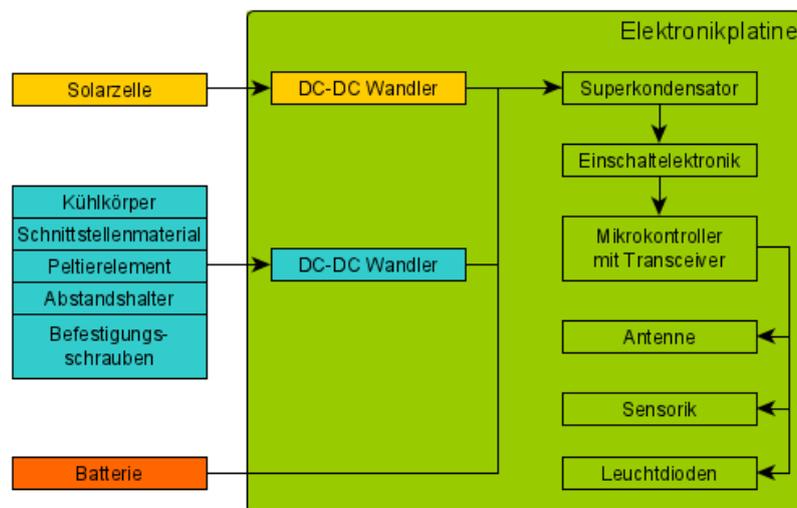


Abbildung 1: Komponenten des energieautarken Funksensorknotens

Als Funktechnologie kommt in dem Sensorknoten die LPWAN Technologie mioty® zum Einsatz, mit der hohe Reichweiten von bis zu 15 km bei geringem Energiebedarf möglich sind. Die erfassten Messwerte werden in einer bestimmten Periode gemittelt, um die Payload und damit wiederum den Energiebedarf gering zu halten. Ein solcher Funksensorknoten hat die in **Tabelle 1** gelisteten Leistungsbedarfe abhängig von seiner Aktivität. Es werden 2 Anwendungsfälle (Use Cases) betrachtet, die sich in der Häufigkeit der Funkübertragung der Daten unterscheiden.

Tabelle 1: Parameter und Leistungsbedarf der Anwendungsfälle

Name	Einheit	Use Case 1	Use Case 2
Intervall Temperaturmessung	s	16	16
Intervall Durchflussmessung	s	2	2
Intervall Funkübertragung	min	15	5
Periode der Mittelwertbildung	s	60	32
Payload	byte	61	41
Leistungsbedarf	µW	400	790

2. Auslegung der Energieversorgung

Der Energieverbrauch eines Sensorknotens kann beispielsweise über eine Batterie gedeckt werden. Diese muss aber abhängig von deren Kapazität und dem Energieverbrauch des Sensorknotens regelmäßig ausgetauscht oder nachgeladen werden. Dies verursacht Wartungsaufwände und damit Kosten während des Betriebs, welche bei einer hohen Anzahl an installierten Sensoren schnell ein wirtschaftlicher Show-Stopper werden können.

Um diese Wartungskosten für den Batterieaustausch gering zu halten, sollte die Batterie ausreichend groß gewählt werden, so dass ein Austausch erst nach einigen Jahren erforderlich ist. Entsprechend fällt die Wahl auf eine Lithium Rundzelle. Für den oben gewählten Sensorknoten und den dargestellten Use Case 1 würde z.B. eine 34 Wh Batteriezelle in der Lage sein, den Sensor für ca. 10 Jahre mit einer ausreichenden Menge an Energie zu versorgen. Die Werte können linear auf andere Lebensdauerwerte umgerechnet werden.

Zur Deckung des Energieverbrauchs können alternativ Energy Harvesting Technologien eingesetzt werden. Hier entfällt dann der Batteriewechsel, es muss allerdings eine ausreichende Energiequelle in der Umgebung vorhanden sein. Am Beispiel des drahtlosen Sensorknotens zur Verbrauchserfassung kann das die typische Raumbelichtung am Installationsort sein. Optional kann beispielsweise auch eine Temperaturdifferenz an einer Zuleitung oder Rohr des Verbrauchsmittels genutzt werden.

Ein Beispiel für eine thermoelektrische Energieversorgung ist in **Abbildung 2** dargestellt. Sie besteht aus einem kommerziellen Peltier-Element als Energy Harvester, einer Wärmeankopplung und einem Kühlkörper. Zusätzlich wird ein Spannungswandler (DC-DC Konverter) und ein Kondensator benötigt. Der vorgestellte thermoelektrische Energy Harvester stellt ausreichend Leistung zur Verfügung, um bei einer andauernden Temperaturdifferenz von 10 K zwischen dem Rohr und der Umgebungsluft bei natürlicher Konvektion den Use Case 1 komplett zu versorgen, also 400 μW an elektrischer Leistung kontinuierlich bereit zu stellen.

Das thermoelektrische Energy Harvesting System ist für die Anwendungsfälle in *COMSOL® Multiphysics* simuliert worden. In dieser FEM-Simulation werden sowohl der Wärmetransport durch natürliche Konvektion als auch durch Wärmestrahlung simuliert. In der Simulation werden Temperaturdifferenzen von 0 bis 70 Kelvin zwischen der Wärmequelle und der Umgebungstemperatur betrachtet. Dabei kommt ein standardmäßiger Stiftkühlkörper aus Aluminium (33 g) von 40x40x25 mm³ und ein Peltier-Element von 12x12x4 mm³ zum Einsatz. Zur Reduzierung der Rechenlast wird in der Simulation Gebrauch von den z-x und z-y Symmetrieebenen gemacht. Das graphische Modell der Simulation ist in **Abbildung 2** zu sehen.

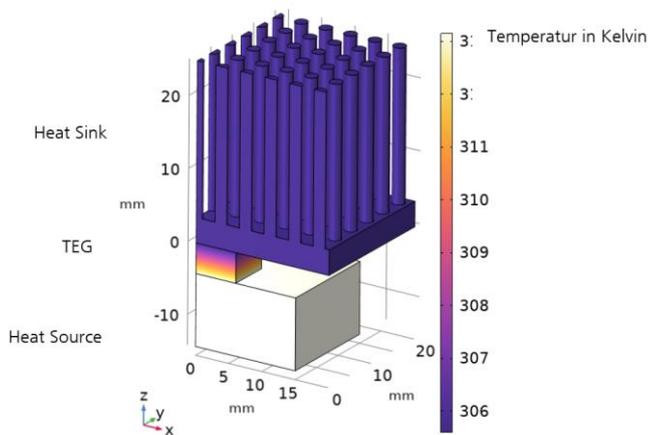


Abbildung 2: Simulationsmodell in COMSOL® für ein Peltier-Element mit Kühlkörper und Wärmequelle

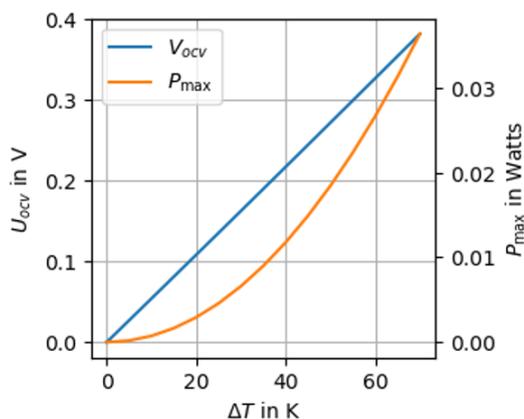


Abbildung 3: Leerlaufspannung und maximale Ausgangsleistung des Peltier-Elements in Abhängigkeit der gesamten Temperaturdifferenz

Abbildung 3 zeigt die simulierte Leerlaufspannung U_{ocv} des thermoelektrischen Generators gegenüber der Temperaturdifferenz ΔT . Ebenfalls wird die maximale elektrische Leistung P_{max} bei einer optimal angepassten Last gemäß der Formel

$$P = \frac{U_{ocv}^2}{4R_i} \quad [1]$$

abgebildet. Hier beschreibt R_i den Innenwiderstand des Peltier-Elements. Bei einer minimalen Temperaturdifferenz von 10 K und einem Wirkungsgrad des DC-DC-Wandlers von 60% ergibt sich somit eine

mögliche Leistung von etwa 440 μW . Die Leistung ist ausreichend, um Use Case 1 zu versorgen. Bei Use Case 2 kommen 2 solcher Harvester zum Einsatz.

Alternativ können Solarmodule zur Versorgung von drahtlosen Sensoren eingesetzt werden. Der Ertrag eines Solarmoduls unter Indoor-Bedingungen lässt sich wie folgt abschätzen.

$$P_{\max} = E_v \cdot \frac{e_r}{e_v} \cdot A \cdot \eta_{\text{pv}}(E_v) \cdot \eta_{\text{DCDC}} \quad [2]$$

Dabei beschreibt E_v die Beleuchtungsstärke in der Einheit Lux, $\frac{e_r}{e_v}$ den Umrechnungsfaktor von $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ zu Lux, A die Fläche des Solarmoduls, η_{pv} den Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke und η_{DCDC} den Wirkungsgrad des DC-DC-Wandlers.

Laut [1] und [2] lässt sich für den Wirkungsgrad $\eta(E_v)$ bei 500 Lux ein Wert von 10% annehmen. Für den DC-DC-Wandler kann ein Wirkungsgrad $\eta_{\text{DCDC}} = 80\%$ verwendet werden. Der Umrechnungsfaktor $\frac{e_r}{e_v}$ zwischen der Beleuchtungsstärke E_v und der Bestrahlungsstärke E_r lässt sich für das Spektrum des Sonnenlichts wie folgt abschätzen:

$$\frac{e_r}{e_v} = 0,0083 \frac{\frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{\text{lux}} \quad [3]$$

Das in diesem Use Case betrachtete Solarmodul weist eine Fläche von 36,5 cm^2 auf. Somit ergibt sich für 500 Lux mit der obigen Formel ein maximaler Ertrag von $P_{\max} = 1,2 \text{ mW}$. Bei einer Beleuchtungsdauer von 8 Stunden pro Tag ergibt sich demnach ein mittlerer Ertrag von $\bar{P} = 0,4 \text{ mW}$. Dabei sind die Verluste des Energiespeichers nicht berücksichtigt.

Die ausgewählte Solarzelle stellt somit ausreichend Leistung zur Verfügung, um bei einer Beleuchtungsstärke von 500 Lux für 8 h am Tag Use Case 1 zu versorgen. Im Use Case 2 werden 2 solcher Solarzellen eingesetzt, um die erforderliche Leistung bereitzustellen.

3. Bestimmung des CO₂-Fußabdrucks

Um die verschiedenen Varianten der Energieversorgung bzgl. ihrer Nachhaltigkeit und Umweltbelastung zu bewerten, wird der CO₂-Fußabdruck, der bei der Produktion aller Bauteile anfällt, abgeschätzt und verglichen. Im Betrieb müssen diese energieautarken Systeme nicht vom Stromnetz gespeist werden, somit ist ihr CO₂-Fußabdruck während des Betriebs gleich null. Die Bauteile sind in Kategorien zusammengefasst und deren Anteil am gesamten CO₂-Fußabdruck in Diagrammen dargestellt. Bauteilkategorien, deren Anteil kleiner als 5% ist, werden zusammengefasst.

Für die Analyse sind Werte aus der *Sphera LCA for Experts* Datenbank herangezogen worden. Die ICs werden auf Basis ihres Gehäuses untersucht, d.h. die Flächen sind über Faktoren aus der Datenbank abgeschätzt. Alle mechanischen Bauteile werden über ihre Masse untersucht (zum Beispiel Abstandshalter aus Nylon, thermisches Schnittstellenmaterial aus Bornitrid/Silikon, ...). Für den Kühlkörper nutzt man Werte für ein eloxiertes Aluminiumstrangprofil [3]. Keine weitere Bearbeitungsschritte wurden hier berücksichtigt. Durch Verwendung von recyceltem Aluminium lässt sich das Ergebnis noch deutlich reduzieren. Für das Peltier-Element (TEG) sind die Einzelkomponenten (BiTe-Pellets, AlO-Substrat, Lötzinn) bewertet und aufsummiert worden. Für die weiteren Berechnungen des CO₂-Fußabdrucks wird ein TEG mit kleineren Abmessungen von 9,8 x 9,8 x 2,1 mm^3 verwendet. Dieser TEG hat eine höhere Leistungsabgabe als der in Kapitel 2 vorgestellte TEG. Dies führt zu einem geringeren CO₂-Fußabdruck pro Ausgangsleistung und somit wird der CO₂-Fußabdruck der thermoelektrischen Variante nicht unterschätzt. Der Herstellungsprozess wird bei den mechanischen Bauteilen aufgrund Datenmangel nicht berücksichtigt. Bei der reinen Betrachtung der enthaltenen Materialien könnte daher der CO₂-Fußabdruck der Bauteile noch unterschätzt sein. Die Batterie wird nach [3] als LiMn-CR2/3AA berücksichtigt und deren Energieinhalt wird auf die Anwendungsfälle skaliert. Der Zusammenbau des Gesamtsystems und Installationsaufwände werden nicht berücksichtigt.

Der CO₂-Fußabdruck der Solarmodule wird anhand der Veröffentlichung von [5] bestimmt. Demnach weist ein kristallines PV-Modul einen CO₂-Fußabdruck von circa 650 $\text{g CO}_2\text{e}$ pro Watt Peak auf. Dabei wird angenommen, dass das Modul in China produziert ist und ohne *Balance-of-System* bewertet wird, da die Elektronik in dieser Arbeit separat bewertet wird.

Der CO₂-Fußabdruck und die Verteilung auf die einzelnen Komponenten ist in **Abbildung 4** gezeigt. Unter

Anteile < 5% fallen Kondensatoren, Widerstände, Induktivitäten, Superkondensator, LED, Quarze, Transistoren, Antennen, Schrauben, Transformatoren, TIM und in manchen Fällen auch Dioden, Nylon und der TEG.

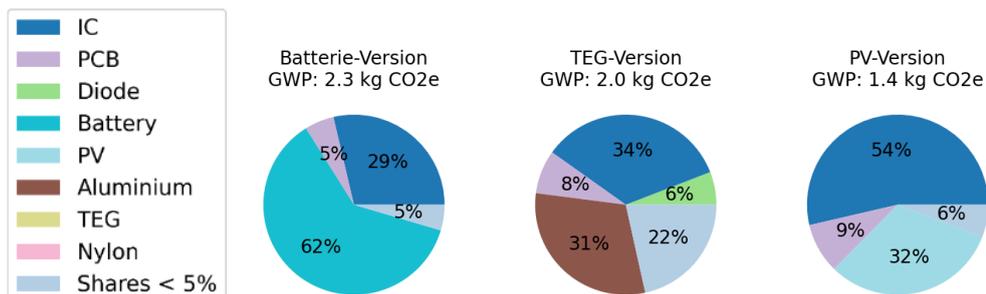


Abbildung 4: CO₂-Fußabdruck der Herstellung bei Use Case 1

Im Fall der Energieversorgung mit einer Batterie ergeben sich 2,3 kg CO₂e für die Herstellung bei einer Laufzeit von 10 Jahren. Wird die Batterie durch einen thermoelektrischen Harvester ersetzt, ergibt sich ein CO₂-Fußabdruck von nur 2,0 kg CO₂e und damit nur 87% des CO₂-Fußabdrucks der Version mit Batterie. Bei der photovoltaischen Energieversorgung beträgt der CO₂-Fußabdruck nur 1,4 kg CO₂e und damit nur 61% des CO₂-Fußabdrucks der Batterieversion. In allen Fällen sind die beiden größten Anteile am gesamten CO₂-Fußabdruck die integrierten Schaltungen (ICs) und die Energieversorgung. Bei der thermoelektrischen Variante sind die Anteile der ICs und der Energieversorgung (Aluminium, Nylon, TEG, Schraube, TIM) etwa gleich groß. Bei der Solarvariante überwiegen die ICs und bei der Batterievariante die Energieversorgung. Nächst größter Einflussfaktor ist die Leiterplatte (PCB) mit etwa 5% bis 9%. Alle weiteren Kategorien haben einen Anteil unter 5% am gesamten CO₂-Fußabdruck. Die Größe und damit der CO₂-Fußabdruck ist bei den Energy Harvesting Systemen nur von den Umgebungsbedingungen und dem Energiebedarf abhängig, da diese zusammen mit der Größe die Leistungsausbeute bestimmen. Der CO₂-Fußabdruck ist aber nicht von der Laufzeit abhängig, da die Leistung aus der Umgebung stetig nachgeliefert wird. Bei der Version mit Batterie steigt der CO₂-Fußabdruck dagegen mit Energiebedarf und Laufzeit, da damit auch die Größe der nötigen Batterie und deren CO₂-Fußabdruck anwächst.

Für Use Case 2, der ca. den doppelten Energiebedarf hat, ergeben sich Werte in **Abbildung 5** für den CO₂-Fußabdruck.

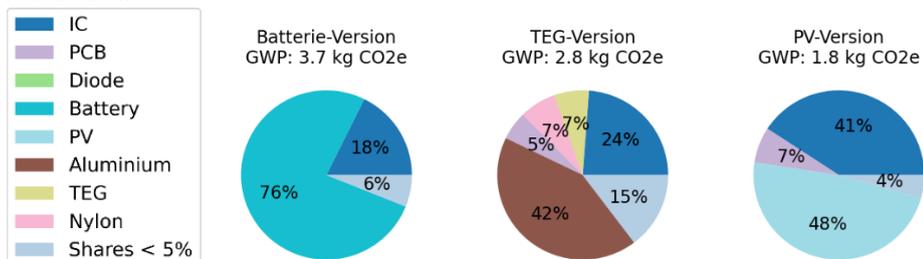


Abbildung 5: CO₂-Fußabdruck der Herstellung bei Use Case 2

Auch bei diesem Use Case hat die Variante mit Batterie den höchsten CO₂-Fußabdruck, die Variante mit thermoelektrischer Energieversorgung einen niedrigeren und die Solarvariante den niedrigsten. Geändert hat sich nur der CO₂-Fußabdruck der jeweiligen Energieversorgung, und zwar bei der Batterievariante ca. um den Faktor 2 und bei den anderen beiden Varianten genau um den Faktor 2. Die Energieversorgung hat bei Use Case 2 bei allen Systemen den größten Anteil. Der gesamte CO₂-Fußabdruck der Batterievariante beträgt hier 3,7 kg CO₂e und ist damit um den Faktor 1,61 im Vergleich zu Use Case 1 gestiegen. Bei der thermoelektrischen Variante beträgt der CO₂-Fußabdruck 2,8 kg CO₂e und damit nur 76% des CO₂-Fußabdrucks der Variante mit Batterie im Use Case 2. Er ist um den Faktor 1,40 im Vergleich zum Use Case 1 angestiegen. Bei der Solarvariante beträgt der CO₂-Fußabdruck nur 49% des CO₂-Fußabdrucks der Variante mit Batterie und ist um den Faktor 1,29 zum Use Case 1 angestiegen. Es wird deutlich, dass bei dem System, bei dem die Energieversorgung den größten Anteil am Gesamt-CO₂-Fußabdruck hat, der Gesamt-CO₂-Fußabdruck am meisten steigt, wenn der Energiebedarf des Use Case steigt. Das Verhalten gilt für eine Laufzeit von 10 Jahren.

Tabelle 2: Verhältnis der Energieversorgungsvarianten und der Use Cases hinsichtlich CO₂-Fußabdruck

	Use Case 1 [kg CO ₂ e]	Use Case 2 [kg CO ₂ e]	Anstieg von Use Case 1 zu 2
Batterie	2,3 (100%)	3,7 (100%)	1,61
Thermoelektrisch	2,0 (87%)	2,8 (76%)	1,40
Solar	1,4 (61%)	1,8 (49%)	1,29

4. Break-Even-Point der Laufzeit bei den Use Cases und Worst Case Umgebungsbedingungen

An dieser Stelle soll der Grenzwert untersucht werden, ab dem der CO₂-Fußabdruck der Energieversorgung mit einer Batterie größer ist als der CO₂-Fußabdruck der Energieversorgung über PV- bzw. TEG. Zu diesem Zweck wird der CO₂-Fußabdruck der Batterie linear mit der spezifizierten Lebensdauer des Sensors skaliert. Je länger der Funksensor eingesetzt werden soll, desto größer ist die benötigte Batterie und somit auch der CO₂-Fußabdruck. Da die Energy Harvesting Lösungen allerdings einen konstanten Energieertrag über die Energie der Umgebung liefern, ist hier das durch die Produktion erzeugte CO₂-Fußabdruck unabhängig von der Einsatzdauer des Funksensors.

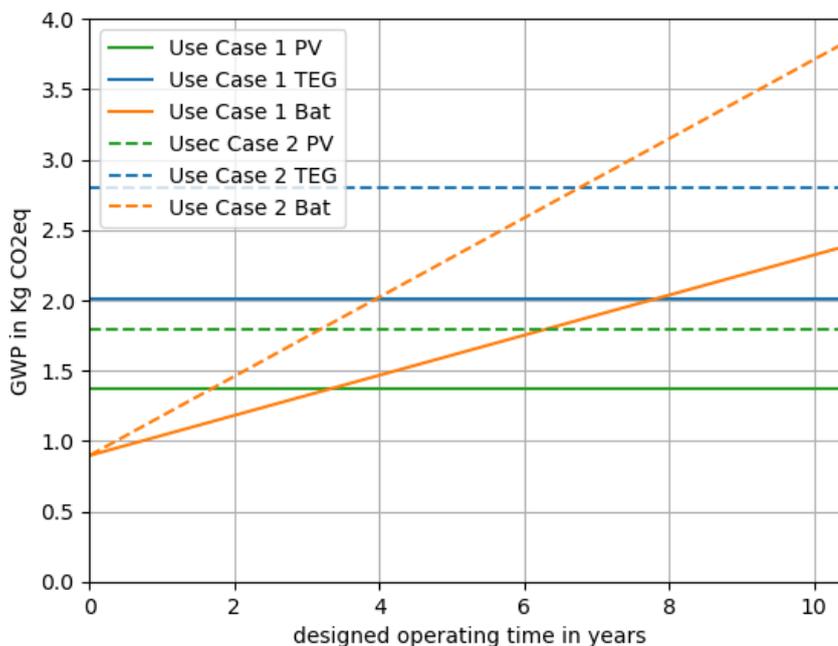


Abbildung 6: Der CO₂-Fußabdruck der beiden Use Cases mit den jeweiligen Lösungen zur Energieversorgung verglichen mit dem CO₂-Fußabdruck einer Primärzelle

Abbildung 6 zeigt den CO₂-Fußabdruck der Batterie als Funktion der geplanten Lebensdauer. Gleichzeitig sind die CO₂-Fußabdrücke der Energy Harvesting Lösungen als konstante Gerade eingezeichnet, da diese ja unabhängig von der geplanten Einsatzdauer sind. Hierbei stellt sich heraus, dass im ersten Use Case der batteriebetriebene Funksensor ab etwa 3,5 Jahren einen größeren CO₂-Fußabdruck als die PV-Lösung hat und ab 7,5 Jahren einen größeren CO₂-Fußabdruck als die TEG-Lösung hat. Der größere Energiebedarf im zweiten Use Case führt dazu, dass die Schnittpunkte der CO₂-Fußabdrücke um circa ein halbes Jahr bei PV bzw. um circa ein ganzes Jahr bei TEG früher auftreten. Das ist darin begründet, dass in beiden Use Cases das PV-Modul einen geringeren CO₂-Fußabdruck pro Mikrowatt Leistung besitzt als der TEG.

5. Zusammenfassung

Der Artikel untersucht den CO₂-Fußabdruck der Produktion von drahtlosen Funksensoren. Es wird eine Vorgehensweise vorgestellt, die den CO₂-Fußabdruck der Produktion der einzelnen Bauteile dieser Funksensoren abschätzt. Als Beispiel dient in diesem Artikel ein drahtloser Sensorknoten zur Erfassung von Verbrauchswerten wie Wärme, elektrische Energie oder Wasser. Dieser Sensor wird mit unterschiedlichen Leistungsverbräuchen und verschiedenen Energieversorgungen hinsichtlich seines CO₂-Fußabdrucks analysiert.

Es zeigt sich in bestimmten Szenarien ein geringerer CO₂-Fußabdruck in der Herstellung der Energieversorgung bei der Nutzung von Energy Harvesting im Vergleich zum Betrieb mit Primärbatterien. Beispielsweise wird errechnet, dass bei einem Leistungsverbrauch eines Funksensors von 800 µW und einer Laufzeit von 10 Jahren der CO₂-Fußabdruck um 50 % reduziert werden kann, wenn statt einer Primärbatterie eine Solarzelle eingesetzt wird, vorausgesetzt es steht eine Beleuchtungsstärke von 500 Lux für 8 h täglich zur Verfügung. Dieser CO₂-Fußabdruck ist jedoch abhängig von Umgebungsbedingungen in Form von Beleuchtungsstärke bzw. Temperaturdifferenz, Laufzeit und Energiebedarf des Sensorknotens. Daher wird im Weiteren der Schnittpunkt untersucht, an dem die Energieversorgung durch Energy Harvesting den gleichen CO₂-Fußabdruck hat als die Versorgung über Batterie (Break-Even-Point).

Quellenverzeichnis

- [1] E. Bunea, K. Wilson, Y. Meydbray, M. Campbell and D. De Ceuster, "Low Light Performance of Mono-Crystalline Silicon Solar Cells," IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy, Waikoloa, 2006, pp. 1312-1314.
- [2] F. Mavromatakis, F. Vignola and B. Marion, Low irradiance losses of photovoltaic modules, Solar Energy, 2017, pp. 496-506.
- [3] S. Benecke, "Systemverhalten von Energy Harvestern in autonomen Sensoren unter Betrachtung der Wechselwirkung von Funktionalität und Umweltverträglichkeit", Ph.D. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2019
- [4] E. Masanet and A. Horvath, "Battery Case Study: The Impact of Extended Producer Responsibility in California on Global Greenhouse Gas Emissions." <https://www2.calrecycle.ca.gov/Publications/Download/1002>, 2012.
- [5] A. Khan et al., "Global warming potential of photovoltaics with state-of-the art silicon solar cells: Influence of electricity mix, installation location and lifetime", Solar Energy Materials and Solar Cells, 2024.
- [6] P. R. Michael, D. E. Johnston and W. Moreno, "A conversion guide: solar irradiance and lux illuminance," Journal of Measurements in Engineering, vol. 8, no. 4, pp. 153–166, Dec. 2020, doi: 10.21595/jme.2020.21667.