

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

MEMS Energy Harvesting für Machine Monitoring

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

Niels Clausen (Fraunhofer ISIT), Torben Dankwort (Fraunhofer ISIT), Ole Behrmann (Fraunhofer ISIT), Björn Gojdka (Fraunhofer ISIT), 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 Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert.

Kompetenzzentrum »Green ICT @ FMD«

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

Ansprechperson
Niels Clausen niels.clausen@isit.fraunhofer.de

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

Veröffentlicht:
dd.mm.yyyy

1. Einleitung und Zusammenfassung

Das Ziel dieser Studie ist die Untersuchung der CO₂-Ökobilanz eines MEMS Energy Harvester. Dabei soll insbesondere der Einfluss zentraler Designparameter untersucht werden. Im Anschluss wird die Ökobilanz mit einem rein batteriebetriebenen System verglichen. Die Untersuchung wird exemplarisch durchgeführt ausgehend von einem Anwendungsfall aus dem Bereich Maschinenüberwachung der von dem Unternehmen Framatome GmbH definiert wurde.

In *Abschnitt 2* wird das Vorgehen zur Umweltbewertung bestehender Harvester erläutert. Der in diesem Abschnitt ermittelte Wert für die Ökobilanz eines real existierenden MEMS Energy Harvesters bildet die Grundlage für die spätere Umweltbewertung virtueller Designs. Da der Schwerpunkt auf der Erstellung der Ökobilanz liegt und weniger auf dem Design des Harvesters, wird letzteres in *Abschnitt 3* nur skizzenhaft dargestellt. Der wesentliche Teil widmet sich in *Abschnitt 4* der Ökobilanz und der Optimierung des ausgewählten Designs, gefolgt von einem Vergleich der CO₂-Bilanzen des Harvesters und der Batterie in *Abschnitt 5* und einer Analyse des CO₂-Gesamteinsparpotential für das Unternehmen Framatome in *Abschnitt 6*.

2. Umweltbewertung eines MEMS Energy Harvester

Zur Ermittlung der CO₂-Emissionen für die Herstellung des Harvesters sind grundsätzlich zwei Ansätze anwendbar: der Bottom-Up-Ansatz und der Top-Down-Ansatz. Beim Bottom-Up-Ansatz wird der CO₂-Ausstoß jedes einzelnen Herstellungsschrittes ermittelt und zu einem Gesamtwert addiert, wobei spezifische Verbrauchsdaten wie der Stromverbrauch berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu betrachtet der Top-Down-Ansatz den Gesamt-CO₂-Ausstoß der Fabrikationslinie und gewichtet ihn anhand des für die Herstellung des Harvesters notwendigen Aufwands. Der CO₂-Ausstoß pro Die wird auf Basis des Produktionsflusses berechnet. Ein Die ist in der Mikrosystemtechnik die Bezeichnung für ein einzelnes, ungehäustes Stück des Wafers, im vorliegenden Fall entspricht dies einem Harvester.

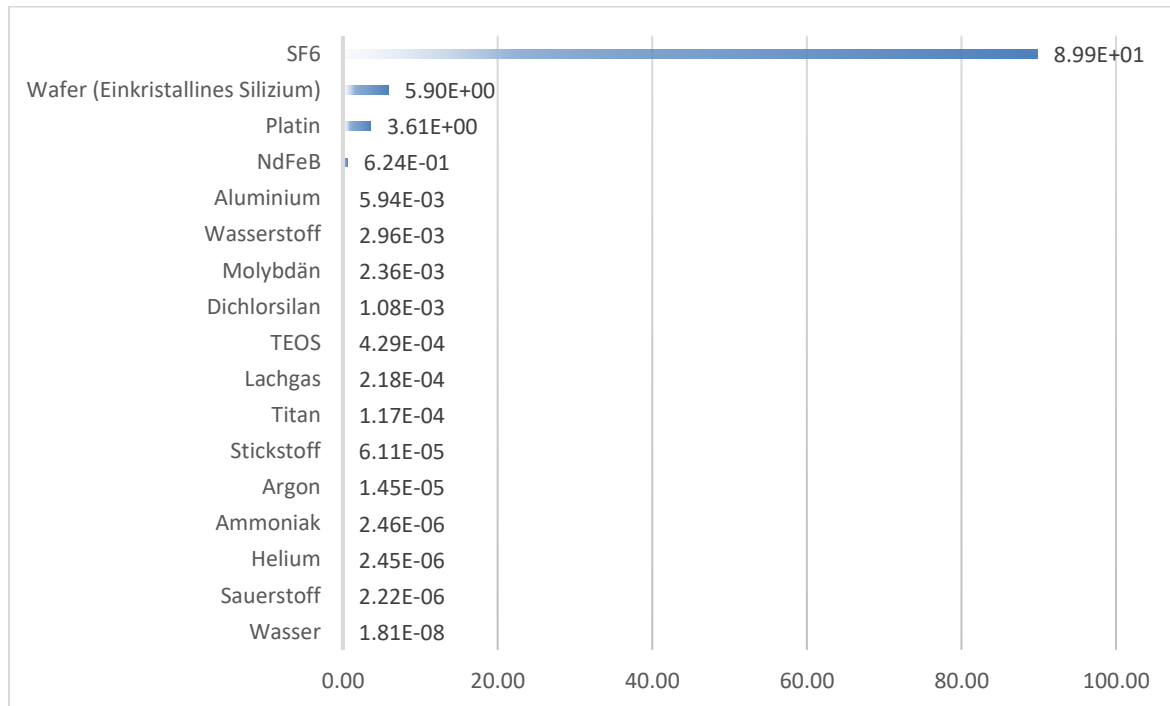
Um eine CO₂-Abschätzung nach dem Bottom-Up-Verfahren zu erstellen, müssten zahlreiche Prozessschritte und CO₂-Fußabdrücke der Herstellung einzelner Chemikalien betrachtet werden. Aufgrund des hohen Aufwands wurde dieser Ansatz in dieser Studie nicht weiterverfolgt. In dieser Studie wurde daher der Top-Down-Ansatz gewählt. Der Gesamt-CO₂-Ausstoß der Fabrikationslinie berücksichtigt Scope 1 und 2, nicht aber Scope 3. Scope 1 deckt die direkten Emissionen aus Quellen, die direkt vom Unternehmen verantwortet oder kontrolliert werden. Scope 2 subsumiert indirekte Emissionen aus eingekaufter Energie (wie Strom, Wasserdampf, Fernwärme), Scope 3 sind die restlichen indirekten Emissionen, die entlang der Wertschöpfungskette des Unternehmens entstehen [1]. Da der gesamte CO₂-Ausstoß des Instituts nicht den Scope 3 berücksichtigt, wurde diesem zumindest teilweise Rechnung getragen, indem der CO₂-Fußabdruck für die Produktion der verwendeten Chemikalien, soweit bekannt, ermittelt wurde. Entsprechend des Verbrauchs ergibt sich dann ein Wert für den CO₂-Fußabdruck des Harvesters für Scope 3. Dieser wird zu den berechneten Scope 1 und 2 Anteilen aus dem Top-Down-Ansatz addiert. Das verwendete Vorgehen stellt also einen hybriden Ansatz aus Top-Down und Bottom-Up dar.

Im Rahmen des Top-Down-Ansatzes wurden CO₂-Abschätzungen unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien für zwei Fabrikationslinien durchgeführt: eine forschungsorientierte Fabrikationslinie, wie am Fraunhofer ISIT vorhanden, sowie eine kommerzielle Fabrikationslinie. Die Unterschiede liegen vor allem in der Auslastung: Die forschungsorientierte Fabrikationslinie am ISIT produziert an 5 Tagen pro Woche für 9 Stunden, während die kommerzielle Linie üblicherweise im Dreischichtbetrieb 24 Stunden an 7 Tagen in der Woche arbeitet. Für diese Szenarien ergaben sich CO₂-Emissionen von 7,70 kg CO₂-Äq./Die (0,11 kg CO₂-Äq./mm²) und 1,75 kg CO₂-Äq./Die (0,025 kg CO₂-Äq./mm²). Der letztgenannte Wert wurde durch Skalierung ermittelt, um eine voll ausgelastete und 24/7 produzierende Fabrikationslinie abzubilden.

Entsprechend des Medienverbrauchs ergab sich für Scope 3 ein Wert von 0,125 kg CO₂-Äq./Die (0,0018 kg CO₂-Äq./mm²). Für die forschungsorientierte Fabrikationslinie ergibt sich somit ein Gesamtwert von 7,82 kg CO₂-Äq./Die (0,112 kg CO₂-Äq./mm²) und für die kommerzielle Fabrikationslinie 1,87 kg CO₂-Äq./Die (0,027 kg CO₂-Äq./mm²). In den folgenden Berechnungen wird der Wert für die kommerzielle Fabrikationslinie verwendet.

Im *Diagramm 1* sind die Anteile in Prozent der jeweiligen Chemikalien am CO₂-Fußabdruck für den Scope 3 des Harvesters dargestellt. SF₆ hat mit Abstand den größten Einfluss auf die CO₂ Bilanz. Für einige der im Prozess verwendeten Chemikalien konnten keine Werte ermittelt werden. Der CO₂-Fußabdruck für den Scope 3 des Harvesters ist daher nur teilweise abgedeckt.

Diagramm 1: Anteil (in Prozent) der jeweiligen Chemikalien am CO₂-Fußabdruck für den Harvester für Scope 3, soweit die CO₂ Werte der Chemikalien verfügbar sind. Berücksichtigt nur die CO₂-Entstehung bei der Herstellung der Chemikalien. (Werte für Mo, Al, SF₆: Ecoinvent (2024), übrige: GaBi Datenbank (2024))



3. Ermittlung eines MEMS Energy Harvester Kandidaten für den Anwendungsfall

Im Folgenden wird zunächst die Funktionsweise eines MEMS Energy Harvesters grundlegend dargestellt und anschließend für einen konkreten Anwendungsfall diskutiert. In *Abbildung 1* ist die Geometrie eines einseitig eingespannten Harvesters illustriert. Üblich ist die Anregung des Harvesters durch mechanische Ankopplung an Vibrationen aus der Umgebung. Die externe mechanische Anregung führt zu einer Schwingung der Masse bei ihrer Resonanzfrequenz. Auf Grund des piezoaktiven Materials, welches auf dem Biegebalken aufgebracht ist, wird mit Hilfe des piezoelektrischen Effektes eine elektrische Spannung erzeugt. Dies ist das Ausgangssignal des Harvesters. Um mehr Leistung zu generieren, kann eine magnetische Anregung des Harvesters erfolgen [2]. Zur Integration der dafür benötigten Mikromagneten in den Harvester kann die PowderMEMS®-Technologie verwendet werden. Details hierzu finden sich in [3]. Im Falle der kontaktlosen magnetischen Anregung führen positionsabhängige Kräfte zwischen einem externen Magneten und dem Magneten in der Masse des Harvesters bei einer Relativbewegung zu einer Auslenkung und in der Folge zu einer Schwingung. In dieser Studie wird eine magnetische Anregung gewählt, da diese im Anwendungsfall kontaktlos erfolgen kann und potenziell die Erzeugung einer höheren Ausgangsleistung ermöglicht.

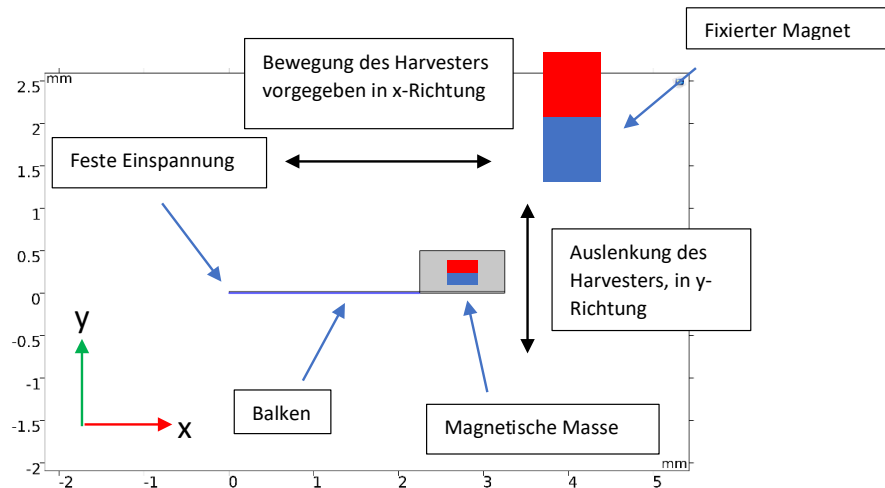


Abbildung 1: Illustration der Geometrie des MEMS Energy Harvesters und der magnetischen Anregung.

Da das Ausgangssignal des magnetisch getriebenen MEMS Energy Harvester die kontaktlose Erfassung mechanischer Bewegungen ermöglicht, eignet sich das Bauteil potenziell zur Überwachung von beweglichen Objekten.

Zur anwendungsspezifischen Auslegung und Bewertung eines mechanischen Harvesters muss zunächst das antreibende Eingangssignal betrachtet werden. Die Bewegung des Harvesters ist durch die Spezifikation des Anwendungsfalls vorgegeben. Mittels einer Magnetik-Simulation mit COMSOL Multiphysics lässt sich das anwendungsspezifische Eingangssignal resultierend aus der Interaktion der Magnete näherungsweise modellieren. Nach der Spezifikation des Eingangssignals wird eine Parametervariation der Harvester-Geometrie durchgeführt, um verschiedenen Harvester-Eigenfrequenzen zu erhalten. Durch Variation der Dicke des Biegebalkens wird die Eigenfrequenz auf den Anwendungsfall angepasst, um die Leistungserzeugung des Harvesters zu maximieren. Die Geometrie der entsprechenden 2D-Simulation ist in *Abbildung 1* dargestellt. Es wird eine piezoaktive Fläche von $2,25 \times 6 \text{ mm}^2$ (Balkenlänge x Balkenbreite) gewählt, die Länge der Masse beträgt 1 mm, so dass die gesamte Harvesterfläche $19,5 \text{ mm}^2$ beträgt. Die Dicke des Biegebalkens wurde variiert zwischen $10 \text{ }\mu\text{m}$ und $40 \text{ }\mu\text{m}$. Das piezoaktive Material ist AlScN und das magnetische Material in der Masse NdFeB. Aus den gewonnenen Ergebnissen, siehe *Abbildung 2*, wurde der optimale Kandidat gewählt: Die Eigenfrequenz beträgt für diesen $1041,3 \text{ Hz}$ und die simulativ erfasste Ausgangsleistung beträgt im arithmetischen Mittel $563,8 \text{ }\mu\text{W}$. Dieser Wert liegt weit über der für den Anwendungsfall spezifizierten Ausgangsleistung von $150 \text{ }\mu\text{W}$. Es erfolgt an dieser Stelle keine detaillierte Stressbetrachtung für das Bauteil, da diese außerhalb des Rahmens dieser Umweltstudie läge. Für die reale Umsetzung ist ein anwendungsspezifisches MEMS-Design unter Berücksichtigung des mechanischen Stresses im Anregungsprofil der Anwendung zu entwickeln.

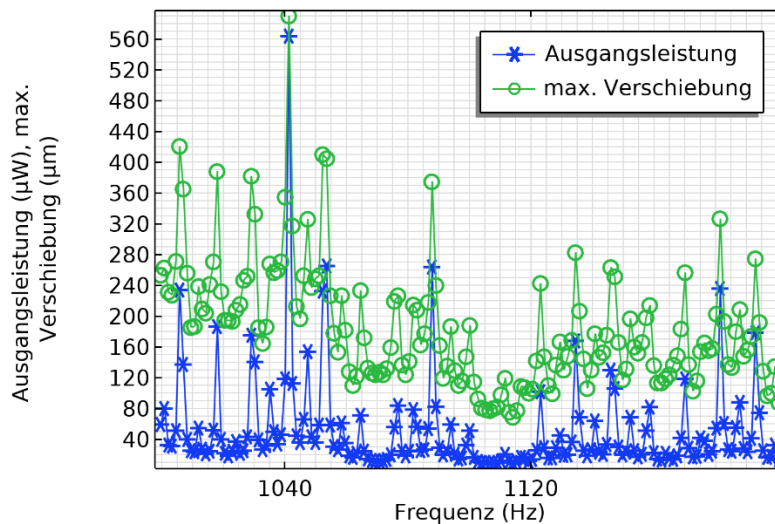


Abbildung 2: Ausgangsleistung und maximale Verschiebung in Abhängigkeit von der Eigenfrequenz des Harvesters. Die dargestellten Eigenfrequenzen entsprechen hier Dicken des Biegebalkens im Bereich von 28 µm bis 32 µm.

4. Umweltbewertung für das ausgewählte Design

Für die Bewertung eines spezifischen Harvester Designs muss der Einfluss verschiedener Designparameter auf die Ökobilanz untersucht werden. Es soll hier der Einfluss der Harvesterfläche und der Dicke des Biegebalkens auf die Ökobilanz ermittelt werden. Die Fläche des Harvesters berücksichtigt im Idealfall die Schnittverluste, also die Tatsache, dass nicht die gesamte Waferfläche genutzt werden kann. Die Schnittverluste werden in diesem Abschnitt zur Vereinfachung ignoriert, beim Vergleich mit der Batterie (*Abschnitt 5*) werden diese aber berücksichtigt. Bei konstanter Dicke des Biegebalkens könnten die Werte aus dem obigen hybriden Ansatz (*Abschnitt 2*) verwendet werden und müssten nur entsprechend der Fläche des jeweiligen Designs skaliert werden, um einen CO₂-Fußabdruck für das Design zu erhalten. Da aber auch die Dicke des Biegebalkens variieren soll, wurden für den Einfluss der Dicke des Biegebalkens die für die CO₂-Bilanz entscheidenden Prozessschritte identifiziert. Dies sind zum einen die Epitaxie, zur Erzeugung der Polysilizium-Schicht und das Hochratenätzen zur Strukturierung der Polysilizium-Schicht. Der hierbei anfallende Stromverbrauch und die verwendeten Chemikalien tragen zum CO₂-Fußabdruck des Bauteils bei. Als Key Performance Indicator (KPI) zur Bewertung einer Harvester-Variante dient die Ausgangsleistung pro g CO₂-Äq. Zur Maximierung des KPIs wird eine Parameterstudie durchgeführt. Der Kandidat aus *Abschnitt 3* dient als Ausgangsdesign, durch das die Fläche, die Resonanzfrequenz, das piezoelektrische Material und die Masse festgelegt sind. Variiert werden die Balkendicke und Balkenlänge. Dabei ist die Länge der Masse abhängig von der Balkengeometrie, um die Resonanzfrequenz konstant zu halten. Aufgrund der Randbedingung einer konstanten Bauteilfläche muss zudem die Breite des Harvesters angepasst werden. Der durch magnetische Simulationen modellierte zeitliche Kraftverlauf dient als Anregungssignal.

Die Ergebnisse (*Abbildung 3*) zeigen, dass ein kürzerer Harvester mehr Leistung bei konstanter Balkendicke liefert und somit einen besseren KPI aufweist. Dies war zu erwarten, da die Werte für die mechanischen Spannungen höher sind. Es muss jedoch beachtet werden, dass höhere mechanische Spannung auch zu schnelleren Ausfällen des Harvesters führen kann. Daher muss im Design ein Kompromiss zwischen Stabilität und Leistung gefunden werden.

In *Abbildung 4 a*) ist der Einfluss der Balkendicke auf die Ausgangsleistung für die kürzesten Harvester (2 mm) dargestellt, während in *Abbildung 4 b*) der Einfluss auf den KPI gezeigt wird. Zusätzlich zum Stromverbrauch der Anlagen ist zu berücksichtigen, dass längere Prozesszeiten zur Umsetzung des jeweiligen Bauteildesigns auch zu einer längeren Verweildauer im Reinraum führen. Diesem Umstand wird durch einen entsprechenden Faktor Rechnung getragen (siehe [4]), der in *Abbildung 4 b*) in die blaue Kurve „mit Infrastruktur“ einfließt.

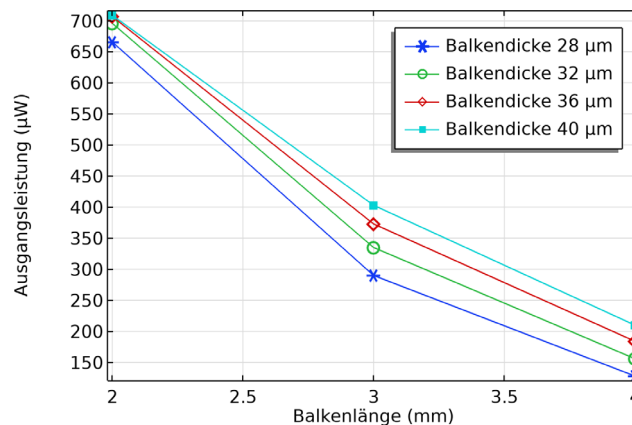


Abbildung 3: Ausgangsleistung in Abhängigkeit von der Balkenlänge. Jede Kurve entspricht einer Balkendicke.

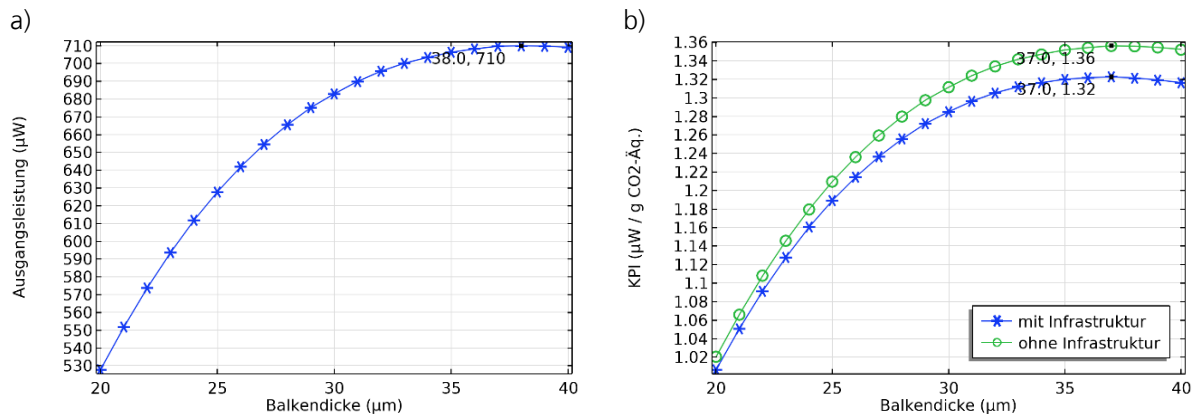


Abbildung 4: Balkenlänge: 2 mm, a) Ausgangsleistung des Harvesters in Abhängigkeit von der Balkendicke. b) KPI in Abhängigkeit von der Balkendicke.

5. Vergleich der CO₂-Bilanzen: Harvester vs. Batterie

Bei der Ausgangsleistung des jeweiligen Harvesters ist zu beachten, dass diese nur genau bei einer Eigenfrequenz erreicht wird. Im Folgenden wird ein Best Case mit der Annahme betrachtet, dass diese ideale Bedingung erfüllt ist. Durch in der Realität bestehende Schwankungen im Herstellungsprozess wird die Eigenfrequenz der Harvesters in der Regel leicht variieren. Daher wird zusätzlich ein Mid Case mit einer leichten Diskrepanz zwischen Anregung und Resonanzfrequenz betrachtet. Im Best Case liefert der Harvester eine Ausgangsleistung von 710 µW (siehe *Abbildung 4*), während im Mid Case von 355 µW ausgegangen wird. Der optimierte Harvester hat eine Balkendicke von 37 µm (siehe *Abbildung 4 b*). Er hat eine Fläche von 3,75 x 5,2 mm², ist also etwas länger und weniger breit als der in *Abschnitt 3* ermittelte Harvester. Auf einem 200 mm-Wafer finden 1420 Chips dieses Designs Platz, wobei 12 % der Waferfläche in Form von Randverlusten ungenutzt bleiben.

Der Wert für den CO₂-Fußabdruck des MEMS Harvester lässt sich aus der *Abbildung 4* ableiten. Der CO₂-Fußabdruck ergibt sich aus der Division der Ausgangsleistung durch den KPI. Unter Berücksichtigung der Reinrauminfrastruktur ist dem optimalen MEMS Harvester somit ein CO₂-Fußabdruck von 537 g CO₂-Äq. zuzuordnen. Die Ausgangsleistung übersteigt sowohl im Best Case als auch im Mid Case die spezifizierte Leistung des Use Case deutlich. Durch eine Anpassung der Breite des Harvesters können CO₂-Fußabdruck

und Ausgangsleistung nahezu gleichermaßen reduziert werden. Im Folgenden werden die Harvester auf 150 μW Ausgangsleistung skaliert, um den Use Case mit minimalem CO_2 -Fußabdruck zu erfüllen. Da die Ausgangsleistung proportional zur Breite des Harvesters skaliert, ergeben sich im Best Case $537 \text{ g CO}_2\text{-Äq.} / 710 \mu\text{W} \cdot 150 \mu\text{W} = 113 \text{ g CO}_2\text{-Äq.}$ und für den Mid Case $537 \text{ g CO}_2\text{-Äq.} / 355 \mu\text{W} \cdot 150 \mu\text{W} = 227 \text{ g CO}_2\text{-Äq.}$

Zur Berücksichtigung der Schnittverluste wird im Best Case ein Faktor von 1,1 und im Mid Case ein Faktor von 1,11 eingeführt. Für einen MEMS Harvester mit 150 μW Ausgangsleistung ist daher im Best Case von einem CO_2 -Fußabdruck von 125 g $\text{CO}_2\text{-Äq.}$ und im Mid Case von 252 g $\text{CO}_2\text{-Äq.}$ auszugehen.

Der Vergleich mit einer Batterie erfolgt für eine handelsübliche Lithium-Manganoxyd-Battereeinheit des Typs CR 2/3 AA, mit einer angenommenen Kapazität von 3,78 Wh bei einem CO_2 -Fußabdruck von 183 g $\text{CO}_2\text{-Äq.}$ [5]. Entsprechend ist der Break Even Point, nach dem die CO_2 -Bilanz des Harvesters günstiger wird als die der Batterie, im Best Case sofort überschritten, wie in *Abbildung 5* dargestellt. Für den Mid Case ist der Break Even Point beim Einsatz einer zweiten Batterie überschritten, was nach 2,87 Jahren der Fall ist.

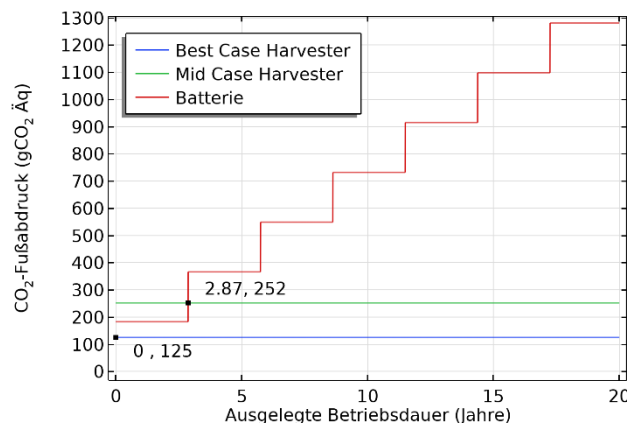


Abbildung 5: Der CO_2 -Fußabdruck der Batterielösung bei einer bestimmte Nutzungsdauer, mit einem Kennwert von 3,78 Wh / 183 g $\text{CO}_2\text{-Äq.}$ (Kapazität / CO_2 -Fußabdruck). Des Weiteren sind die CO_2 -Fußabdrücke der Harvester dargestellt. Die im Anwendungsfall geforderte Leistung beträgt 150 μW .

In dem Anwendungsfall von Framatome dient ein Sensorknoten mit einem Inertialsensor der Maschinenüberwachung. Die ermittelten Daten können in der Anwendung nicht per Kabel übertragen werden, sodass auch für die Datenübertragung per Funk Energie bereitgestellt werden muss. In der derzeitigen Lösung betreibt eine Batterie den Sensorknoten. Das Unternehmen muss den Sensorknoten derzeit alle 2 bis 4 Jahre vollständig austauschen, da der Sensor gemeinsam mit der Batterie verbaut ist. Da die Herstellung des Sensorknotens mit einer signifikanten CO_2 -Emission verbunden ist, schlägt sich der vollständige Wechsel wesentlich in der Ökobilanz nieder. Entsprechend erhöht sich der CO_2 -Fußabdruck der derzeitigen Batterielösung über die reine Energiequelle hinaus, siehe folgend *Abschnitt 6* und [6].

6. Analyse des CO_2 -Gesamteinsparpotentials für den Anwendungsfall

Aufgrund des Einsatzszenarios der Firma Framatome wird eine Stückzahl von 200 Einheiten mit einer Nutzungsdauer von 12 Jahren angenommen. Basierend auf den Berechnungen aus *Abschnitt 5* führt eine Energieversorgung mit Harvestern somit zu einem CO_2 -Fußabdruck im Best Case von 200·125 g $\text{CO}_2\text{-Äq.}$ und 200·252 g $\text{CO}_2\text{-Äq.}$ im Mid Case. Unter der Annahme einer konstanten Leistungsentnahme erfordert der Batteriebetrieb $200 \cdot \text{ceil}(12 \text{ Jahre} \cdot 150 \mu\text{W} / 3,78 \text{ Wh}) = 1000$ Einheiten. Entsprechend ist der Gesamt- CO_2 -Fußabdruck der Batterielösung mit 1000·183 g $\text{CO}_2\text{-Äq.}$ anzunehmen. Die Nutzung von Harvestern anstelle von Batterien führt im Mid Case zu einer CO_2 -Ersparnis von 133 kg $\text{CO}_2\text{-Äq.}$ und im Best Case von 158 kg $\text{CO}_2\text{-Äq.}$ Dargestellt ist das Einsparpotential in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer in *Abbildung 6 a*).

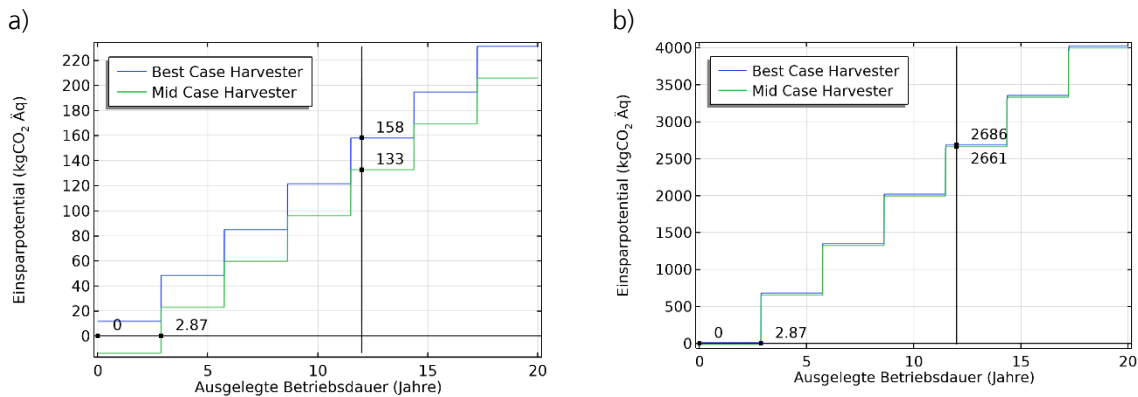


Abbildung 6: Einsparpotential durch Nutzung von Harvestern anstelle von Batterien für den Anwendungsfall von Framatome in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer. Entlang der vertikalen Geraden ist das Einsparpotential bei einer Nutzungsdauer von 12 Jahren abzulesen, die horizontale Gerade veranschaulicht den Break Even. a) Ohne Berücksichtigung des Sensortausches bei Batteriewechsel b) Mit Berücksichtigung des Sensortausches bei Batteriewechsel.

Der Einfluss des Wechsels ganzer Sensoren auf die CO₂-Bilanz bei batteriebetriebenen Lösungen wurde bereits in der Literatur untersucht [6]. Auch für den hier vorliegenden Anwendungsfall muss derzeit beim Batteriewechsel der Sensorknoten mit ausgetauscht werden. Der Einfluss des Wechsels des Sensorknotens auf das Einsparpotential ist in *Abbildung 6 b)* dargestellt. Zur Vereinfachung wurde dafür der CO₂-Fußabdruck von 3,16 kg CO₂-Äq. des Sensorknotens aus [6] angenommen. Die Einsparung erhöht sich im Falle des Sensorknotenwechsel auf 2661 kg CO₂-Äq. im Mid Case und auf 2686 kg CO₂-Äq. im Best Case. Während das CO₂-Einsparpotential innerhalb eines Szenarios mit geringen Stückzahlen erarbeitet wurde, führen IoT-Anwendungsfälle mit deutlich größeren Stückzahlen zu einer entsprechend höheren Reduktion des CO₂-Fußabdrucks. Laut [7] beträgt die Anzahl der IoT-Bauteile im Jahr 2025 weltweit 19,8 Milliarden, bei einem prognostizierten Wachstum auf 31,2 Milliarden Bauteile im Jahr 2030. Davon entfällt ca. ein Viertel auf Europa. Könnten in nur 0,1 bis 1% der Bauteile eine Batterie durch einen mechanischen MEMS Energy Harvester ersetzt werden, entspräche dies ca. 8 bis 80 Millionen Stück im Jahr 2030 in Europa. Bei gleichen Annahmen wie im Anwendungsfall, führt allein der Ersatz der Batterien zu einer durchschnittlichen jährlichen CO₂-Ersparnis in Europa von 442-4.420 Tonnen CO₂-Äq. im Mid Case und 527-5.270 Tonnen CO₂-Äq. im Best Case.

Durch die Berücksichtigung von notwendigen Anfahrten mit dem PKW zum Wechseln von Batterien oder ganzer Sensorknoten, steigt das Gesamteinsparpotential nochmals erheblich. Studien kommen zum Ergebnis, dass sich der CO₂-Fußabdruck von Batterien je nach Use Case durch den Aufwand des Wechsels um eine Größenordnung und mehr vergrößern kann [6]. In diesem Fall wäre von einer jährlichen Einsparung in der Größenordnung von ca. 5.000-50.000 Tonnen CO₂-Äq. auszugehen.

7. Fazit und Ausblick

Beim Design von MEMS Energy Harvestern wurde in dieser Studie zusätzlich zur elektrischen Leistung auch der CO₂-Fußabdruck des Bauteils als Figure of Merit berücksichtigt.

Die theoretische Betrachtung eines realen Einsatzszenarios des Unternehmens Framatome indiziert, dass anwendungsoptimierte mechanische MEMS Energy Harvester eine verbesserte CO₂-Bilanz im Vergleich zur Nutzung einer Batterie erreichen können. Wesentliche Voraussetzungen sind geeignete Anwendungsanforderungen (z.B. benötigte Leistung, Preis der Energiequelle) und -bedingungen (z.B. vorhandene mechanische Anregung).

Treiber des erreichbaren Einsparpotenzials in einem spezifischen Anwendungsszenario sind wesentlich die Anzahl der zu ersetzenden Energiequellen, notwendige Anfahrten zum Auswechseln der Batterie und die mögliche Notwendigkeit des Ersatzes ganzer Systeme.

Literaturverzeichnis

- [1] World Resources Institute, *Sustainability Dashboard Methodology*. [Online]. Available: <https://www.wri.org/sustainability-wri/dashboard/methodology> (accessed: Jun. 16 2025).
- [2] M. T. Bodduluri et al., "Fully Integrated High-Performance MEMS Energy Harvester for Mechanical and Contactless Magnetic Excitation in Resonance and at Low Frequencies," *Micromachines*, vol. 13, no. 6, p. 863, 2022, doi: 10.3390/mi13060863.
- [3] T. Lisec, O. Behrmann, and B. Gojdka, "PowderMEMS—A Generic Microfabrication Technology for Integrated Three-Dimensional Functional Microstructures," *Micromachines*, vol. 13, no. 3, p. 398, 2022, doi: 10.3390/mi13030398.
- [4] ITRS, "International Technology Roadmap for Semiconductors 2.0: Environment, safety, and health," 2015.
- [5] S. Benecke, "Systemverhalten von Energy Harvestern in autonomen Sensoren unter Betrachtung der Wechselwirkung von Funktionalität und Umweltverträglichkeit," Ph. D. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2019.
- [6] P. Maistriaux, T. Pirson, M. Schramme, J. Louveaux, and D. Bol, "Modeling the Carbon Footprint of Battery-Powered IoT Sensor Nodes for Environmental-Monitoring Applications," in *Proceedings of the 12th International Conference on the Internet of Things*, Delft Netherlands, 2022, pp. 9–16.
- [7] Statista, *IoT connections worldwide 2034* | Statista. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/> (accessed: Oct. 20 2025).