

»GREEN ICT @ FMD« – COMPETENCE CENTER FOR ECOLOGICALLY SUSTAINABLE ICT

Energieeffiziente drahtlose Datenkommunikation und ihr Potenzial für eine nachhaltige IKT

A Whitepaper by "HUB 2 – Communication and Infrastructures"

Max Haymann-Pohl¹, Dr. René Kirrbach¹, Philipp Meißner¹

¹Fraunhofer IPMS



Die Arbeit ist Teil des Projekts „Green ICT @ FMD“, Ihrem Kompetenzzentrum für ökologisch nachhaltige Informations- und Kommunikationstechnologie. Das Projekt wurde von der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland ins Leben gerufen und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

Fraunhofer IPMS

Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS)
Maria-Reiche-Straße 2, 01109 Dresden

01109 Dresden, Deutschland

Kontakt

Max Haymann-Pohl max.haymann-pohl@ipms.fraunhofer.de

www.greenict.de

<https://www.ipms.fraunhofer.de/>

Veröffentlichungsdatum

07.11.2025

1. Kurzfassung

Die Arbeit beleuchtet den CO₂-Fußabdruck von IoT-Sensorknoten ganzheitlich und zeigt: In vielen Fällen dominiert die Herstellungsphase die Emissionen, insbesondere durch energie- und ressourcenintensive Komponenten wie Chips, Batterien und Solarzellen. Da der Energiebedarf eines Sensorsystems die Dimensionierung der Energiequelle bestimmt, senkt jede Reduktion des Verbrauchs den Materialeinsatz und damit die „eingebetteten“ Emissionen. Für Spezialanwendungen, in denen Funk (WLAN, BLE) an Grenzen stößt – etwa bei starker elektromagnetischer Störung, in Ex-Zonen, Reinräumen, OPs oder unter Wasser – bietet optische Datenkommunikation (Li-Fi) eine robuste Alternative. Der vom Fraunhofer IPMS entwickelte TinySpot-Transceiver überträgt 12 Mbps bei sehr geringer Energie pro Bit und verkürzt so die aktiven Phasen drastisch, wodurch der Energiebedarf des Sensorsystems gesenkt und somit die Ressourcenintensive Energiequelle klein gehalten werden kann. In einer Beispielanwendung an rotierenden Maschinen ermöglicht dies wartungsfreie, optisch-drahtlose Übertragung und – dank schneller Datentransfers und Standby-Betrieb – einen deutlich geringeren Durchschnittsverbrauch. Eine Cradle-to-Gate-Ökobilanz des solarbetriebenen Sensorknotens zeigt: Durch den Einsatz von TinySpot und passend dimensionierter, kleinerer Energieversorgung sinkt der Systemfußabdruck von 3,05 auf 2,28 kg CO₂e (≈-25 %). Der eigenständige TinySpot liegt bei 0,17 kg CO₂e; die größten Beiträge stammen von aktiven ICs. Methodisch wird ein iterativer, ganzheitlicher Entwicklungszyklus aus Ökobilanz, Hardware- und Firmware-Optimierung sowie System- Redimensionierung angewendet. Im industriellen Rollout ergibt sich in Deutschland ein einmaliges Einsparpotenzial in der Herstellung von grob 110–200 t CO₂e.

Fazit: Li-Fi ergänzt Funktechnologien sinnvoll, steigert Energieeffizienz und senkt den CO₂-Fußabdruck besonders in anspruchsvollen Einsatzumgebungen.

2. Einleitung

Die fortschreitende Digitalisierung hat nahezu alle Bereiche unseres Lebens durchdrungen und ermöglicht beispiellose Effizienzsteigerungen. Gleichzeitig stellt die Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) selbst eine erhebliche Quelle für Treibhausgasemissionen dar. Bei der Entwicklung neuer Technologien, insbesondere im Bereich des Internets der Dinge (IoT), muss daher auch deren CO₂-Fußabdruck zunehmend berücksichtigt werden.

Der CO₂-Fußabdruck von IoT-Sensorknoten wird maßgeblich durch die Herstellungsphase bestimmt [1]. Die Produktion von Mikrochips, Batterien und Solarmodulen ist energie- und ressourcenintensiv, was zu hohen „eingebetteten Emissionen“ führt. Der Energieverbrauch von eingebetteten Sensorsystemen ist zwar sehr gering, jedoch ist je nach Anwendung eine, der Leistungsaufnahme gerechten, Energieversorgung notwendig. Ist das Gerät durch eine Solarzelle versorgt, hängt die benötigte Größe der Zelle von dem durchschnittlichen Stromverbrauch des Sensorknotens ab. Wird das Gerät von einer Batterie versorgt, hängt die Lebensdauer dieser ebenfalls von der Energieeffizienz des Gerätes ab. Sowohl Solarzellen als auch Batterien weisen einen großen CO₂-Fußabdruck auf. Eine Möglichkeit, diese Systeme energieeffizienter und somit ökologischer zu gestalten, ist die Optimierung der Datenschnittstelle. Genau hier setzt die vom Fraunhofer IPMS entwickelte Lösung an.

Während IoT-Technologie in allen Industriesektoren nicht mehr wegzudenken ist, gibt es Anwendungen, in denen herkömmliche Funklösungen wie WLAN oder Bluetooth Low Energy (BLE) an ihre Grenzen stoßen oder nicht eingesetzt werden dürfen. Beispiele hierfür sind Umgebungen mit starken elektromagnetischen Störungen, wie sie in der industriellen Fertigung oder in explosiven Umgebungen auftreten können, oder sensible Bereiche wie Reinräume oder Krankenhäuser. Auch unter Wasser oder in Anwendungen, die eine hochzuverlässige, echtzeitfähige Verbindung erfordern, sind Funktechnologien oft ungeeignet. In diesen Spezialanwendungen muss auf alternative drahtlose Schnittstellen, wie die optische Datenkommunikation (Li-Fi), zurückgegriffen werden [2].

Die Nachfrage nach solchen Produkten steigt, weshalb es im Sinne der Nachhaltigkeit entscheidend ist, den CO₂-Fußabdruck zunehmend in die Betrachtung einzubeziehen. Zudem zeigt die stetige Zunahme des gesamten Energieverbrauchs im IKT-Sektor die Dringlichkeit, technologische Lösungen zu finden, die nicht nur leistungsfähig, sondern auch ökologisch verantwortungsvoll sind [3].

3. Theoretischer Hintergrund

3.1. Carbon Footprint von IoT-Systemen

Der CO₂-Fußabdruck von eingebetteter Sensorik und IoT-Geräten muss ganzheitlich betrachtet werden, sowohl in der Produktions- als auch in der Nutzungsphase. Die genaue Berechnung kann komplex sein, da sie von vielen Faktoren wie dem Herstellungsort, der Art der Rohstoffe und dem Transport abhängt. Eine verbreitete Methode zur Ökobilanzierung ist der „Cradle-to-Gate“-Ansatz, der die Umweltauswirkungen von der Rohstoffgewinnung bis zum Verlassen der Fabrik bewertet und die Nutzungsphase für eine spätere Betrachtung separat ausweist [1].

Ein direkter Zusammenhang besteht zwischen dem Energieverbrauch eines eingebetteten Systems und dem CO₂-Fußabdruck, auch wenn der Verbrauch nur wenige Wattstunden im Jahr beträgt. Energiehungrigere Systeme benötigen größere Stromversorgungskomponenten, wie Solarmodule oder Batterien, die den anfänglichen CO₂-Fußabdruck durch die Herstellung erheblich vergrößern. Umgekehrt ermöglicht eine Reduzierung des Energieverbrauchs den Einsatz kleinerer, ressourcenschonender Bauteile, was die Umweltkosten der Herstellung minimiert. Bei batteriebetriebenen Systemen führt ein höherer Stromverbrauch zudem zu häufigerem Batteriewechsel, was ebenfalls den CO₂-Fußabdruck erhöht.

3.2. Beispielanwendung

Der am Fraunhofer IPMS entwickelte solarbetriebene Sensorknoten kann in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden. Eine typische Anwendung ist das Monitoring von sich schnell rotierenden Objekten in Maschinen, wie zum Beispiel die Temperaturmessung von Fräswerkzeugen mit hoher Abtastrate. Die Datenübertragung von solchen Objekten ist schwierig, da herkömmliche Datenkabel die Rotation behindern würden und eine stabile Stromversorgung eine große Herausforderung darstellt. Herkömmliche Schleifringe wiederum sind wartungsintensiv und treiben die Instandhaltungskosten. Eine optisch-drahtlose Datenübertragung ermöglicht hingegen einen wartungsfreien Betrieb. Eine schematische Darstellung einer solchen Anwendung ist in Abbildung 1 dargestellt.

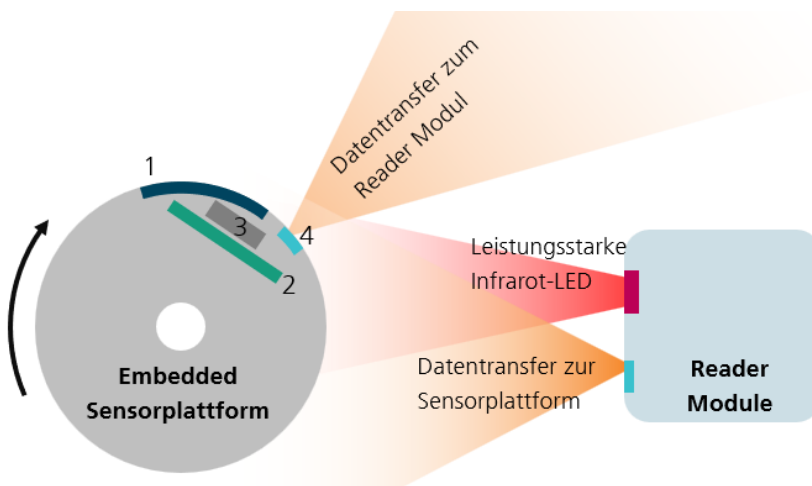


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer energieautarken Sensorik eingebettet in einer rotierenden Welle. (1) Solarzelle, (2) Leiterplatte, (3) Akku, (4) TinySpot

Die Sensorplattform kann in das rotierende Objekt integriert werden. Auf der Außenseite befinden sich eine Solarzelle und ein optisch-drahtloser Transceiver, der Fraunhofer IPMS TinySpot. Das Lesemodul, ebenfalls mit einem TinySpot ausgestattet, wird in einem Abstand von bis zu 1 Meter zum rotierenden Objekt positioniert. Es ist per Kabel mit einem Host-PC oder Server verbunden und kann je nach Anwendungsfall über eine Batterie oder das Stromnetz versorgt werden. Um eine Stromversorgung des Sensors, der über die Solarzellen versorgt wird, auch bei fehlendem Umgebungslicht zu gewährleisten, verfügt das stationäre Lesemodul zusätzlich über leistungsstarke Infrarot-LEDs. Eine spektrale Trennung dieser LEDs vom TinySpot-

Datenkanal ermöglicht eine simultane Datenkommunikation und Energieversorgung.

Das Softwarekonzept sieht vor, dass die Sensorplattform eine definierte Anzahl von Sensorwerten abtastet und diese dann an das Lesemodul sendet. Zwischen den Abtastungen kann das Sensorsystem in einen Standby-Modus wechseln, um Energie zu sparen.

Um die wesentlichen Betriebszustände und deren Stromaufnahme besser bewerten zu können, sind diese in Abbildung 2 dargestellt. Die Datenkommunikation ist ein entscheidender Energieverbraucher, wie es in dieser Abbildung zu sehen ist. Langsame Datenschnittstellen stellen ein „Bottleneck“ dar, die den Energieverbrauch erheblich steigern. Bei der Verwendung eines herkömmlichen IrDA-Infrarot-Transceivers (z.B. TFDU4301) würde die kurze Zeit, in der sich Sender und Empfänger während der Rotation gegenüberstehen, nicht ausreichen, um die Daten zu übertragen. Das Zeitintervall für die Datenübertragung wird mit zunehmender Drehgeschwindigkeit kleiner, was eine schnellere Multi-Mbps-Verbindung zwingend erforderlich macht.

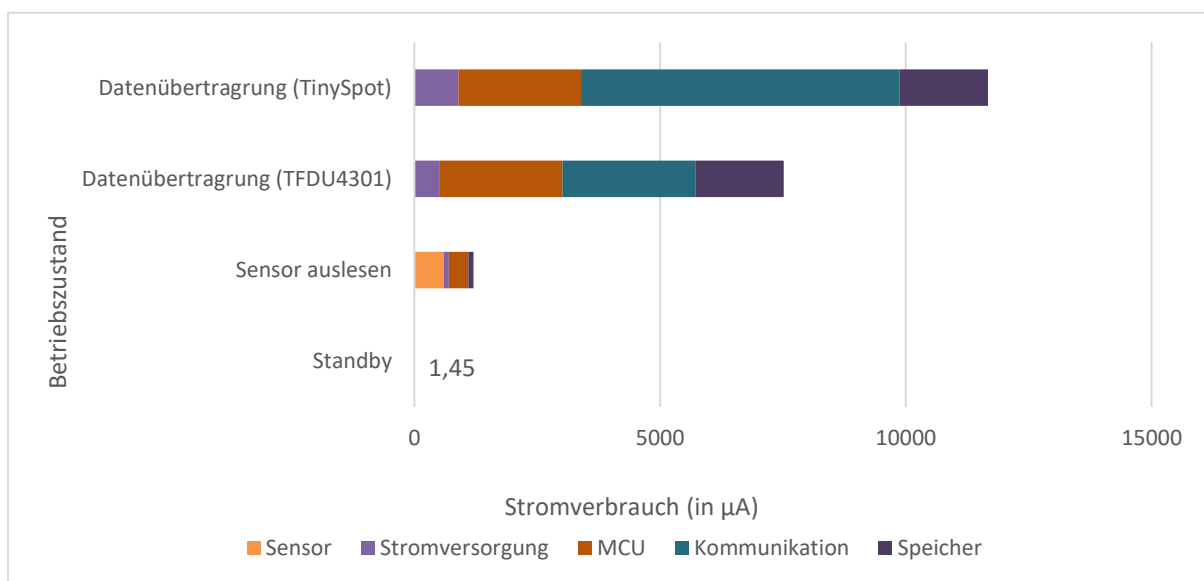


Abbildung 2: Vergleich des Stromverbrauches der Sensorplattform in verschiedenen Betriebszuständen.

3.3. Fraunhofer IPMS TinySpot

Der Fraunhofer IPMS TinySpot-Transceiver (Abbildung 3) ist die vom Fraunhofer IPMS entwickelte Lösung für extrem energiesparsame Anwendungen. Eine einfache UART-Verbindung zu einem Mikrocontroller reicht aus, um ihn als Datenschnittstelle auf einer Leiterplatte zu implementieren. In Tabelle 1 sind wesentliche Parameter des TinySpot dem eines konventionellen Produktes gegenübergestellt.



Abbildung 3: Fraunhofer IPMS TinySpot Modul

Tabelle 1: Vergleich Fraunhofer IPMS TinySpot und Vishay TFDU4301

Parameter	Li-Fi TinySpot	TFDU4301
Datenrate (Mbps)	12	0,115
Abmessungen H x L x B (mm x mm x mm)	10 x 21 x 10	3,1 x 8,5 x 2,5
Reichweite (m)	0,15 to ≥ 1	0 to ≥ 1
Energieverbrauch (mW)	17	7
Energie pro Bit (nJ/Bit)	1,47	61 (@2.5V)
Latenz (μ s)	0,16	50

Obwohl das TinySpot-Modul mit 17 mW eine höhere Leistungsaufnahme im Betrieb aufweist als das TFDU4301-Modul (7 mW), ist es in der Lage, Daten mit 12 Mbps zu übertragen – eine Steigerung um den Faktor 100. Diese enorme Geschwindigkeit verkürzt die Übertragungszeit von 1 MB Daten von Minuten auf Sekunden. Da der aktive Betriebsmodus um fast 99 % kürzer ist, sinkt der Energieverbrauch pro Bit von 61 nJ auf nur 1,5 nJ. Insgesamt senkt der TinySpot den Stromverbrauch während der Übertragung um etwa 75 % und ermöglicht den Einsatz kleinerer Solarzellen und Batterien auf Systemebene. Das Ergebnis ist eine Senkung des gesamten System-CO₂-Fußabdrucks um rund 18 %. Dieser Vergleich zeigt, dass der TinySpot-Transceiver ein hervorragender Ersatz für herkömmliche IrDA-Komponenten in der nächsten Produktgeneration ist.

Die Vorteile des TinySpot sind vielfältig: Er ermöglicht einen geringeren durchschnittlichen Stromverbrauch, wie in Abbildung 4 gezeigt, was den Einsatz kleinerer Photovoltaik-Zellen und Batterien oder eine längere Batterielaufzeit ermöglicht hat. Die höhere Geschwindigkeit und der schnellere Datentransfer sind weitere Pluspunkte. Zudem kann die TinySpot-Technologie an die spezifischen Kundenanforderungen angepasst

werden.

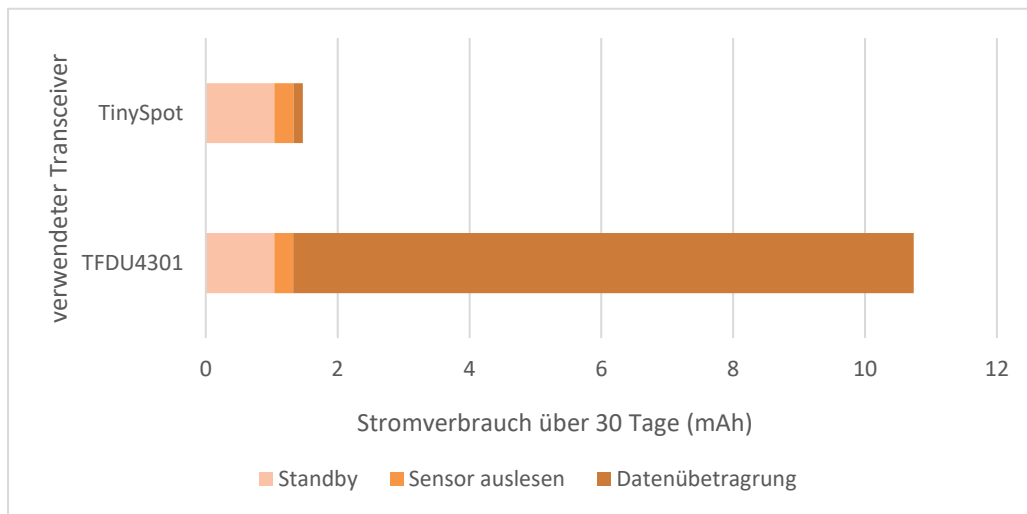


Abbildung 4: Energieverbrauch der Sensorplattform mit konventioneller und mit neuer optischer Schnittstelle mit einer Sensorabtastrate von 1Hz. Die Daten werden in dieser Anwendung in Intervallen von einer Minute an den Mikrocontroller gesendet. Über den Zeitraum von 30 Tagen befindet sich das Sensormodul in verschiedenen Betriebszuständen.

4. Fallstudie

Für die Erläuterung der Methodik und deren Anwendung wurde, der am Fraunhofer IPMS entwickelte, solarbetriebene Sensorknoten, einer detaillierten Ökobilanzierung unterzogen (Abbildung 5). Es wurde ein "Cradle-to-Gate"-Fußabdruck ermittelt, der die Umweltauswirkungen von der Rohstoffgewinnung bis zum Verlassen der Fabrik berücksichtigt. Die Analyse verglich dabei zwei Revisionen des Sensorknotens: eine ursprüngliche Version und eine optimierte Version (Abbildung 6), die die energiesparsame TinySpot-Technologie nutzt.

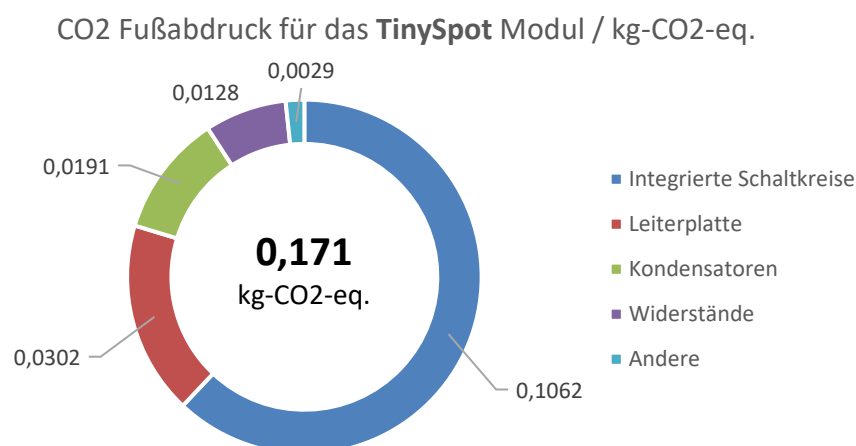


Abbildung 5: CO₂-Fußabdruck des TinySpot Moduls nach Komponentengruppen aufgeschlüsselt.

Der vollständige Sensorknoten V1, der die neue TinySpot Schnittstelle bereits enthält, erreicht einen Wert von 2,28 kg CO₂e und ist damit etwa ein Viertel niedriger als die vorherige Revision, die 3,05 kg CO₂e aufwies. Wie die Emissionen sich im Detail auf die verschiedenen Bauteilgruppen aufteilen, ist in der Abbildung 6 dargestellt. Diese Einsparung ist das Ergebnis des in Abbildung 7 dargestellten Entwicklungskreislaufs für nachhaltige IKT. Diese Methodik umfasst vier wesentliche Schritte, wobei jeder

als Ausgangspunkt für die nachfolgende Weiterentwicklung einer Technologie dienen kann. Im Falle der vorliegenden Arbeit war der Ausgangspunkt eine Ökobilanzierung der Sensorplattform (siehe Abbildung 6). Aus der Analyse der Bilanzierung ergibt sich die Notwendigkeit, den ökologischen Fußabdruck insbesondere über die eingesetzten aktiven Schaltkreise (ICs) und die Solarzelle zu senken, da sie den größten Anteil an der Gesamtbelastung ausmachen. Bezüglich der ICs könnte eine Verringerung des Fußabdruckes erreicht werden. Dies gelang allein durch den Einsatz von Bauteilen, die besser an die Anwendung abgestimmt waren und vor allem nicht hinsichtlich Komplexität überdimensioniert sind, wie es in der ersten Version noch der Fall war. Dies schränkt die Flexibilität des Systems ein, verringert aber die Emissionen in diesem Fall pro Modul um 0,48 kg-CO₂-eq. Die Untersuchungen zeigen eindrucksvoll, wie Hardware- und Softwareanpassungen in Kombination zu einem deutlich geringeren CO₂-Fußabdruck führen.

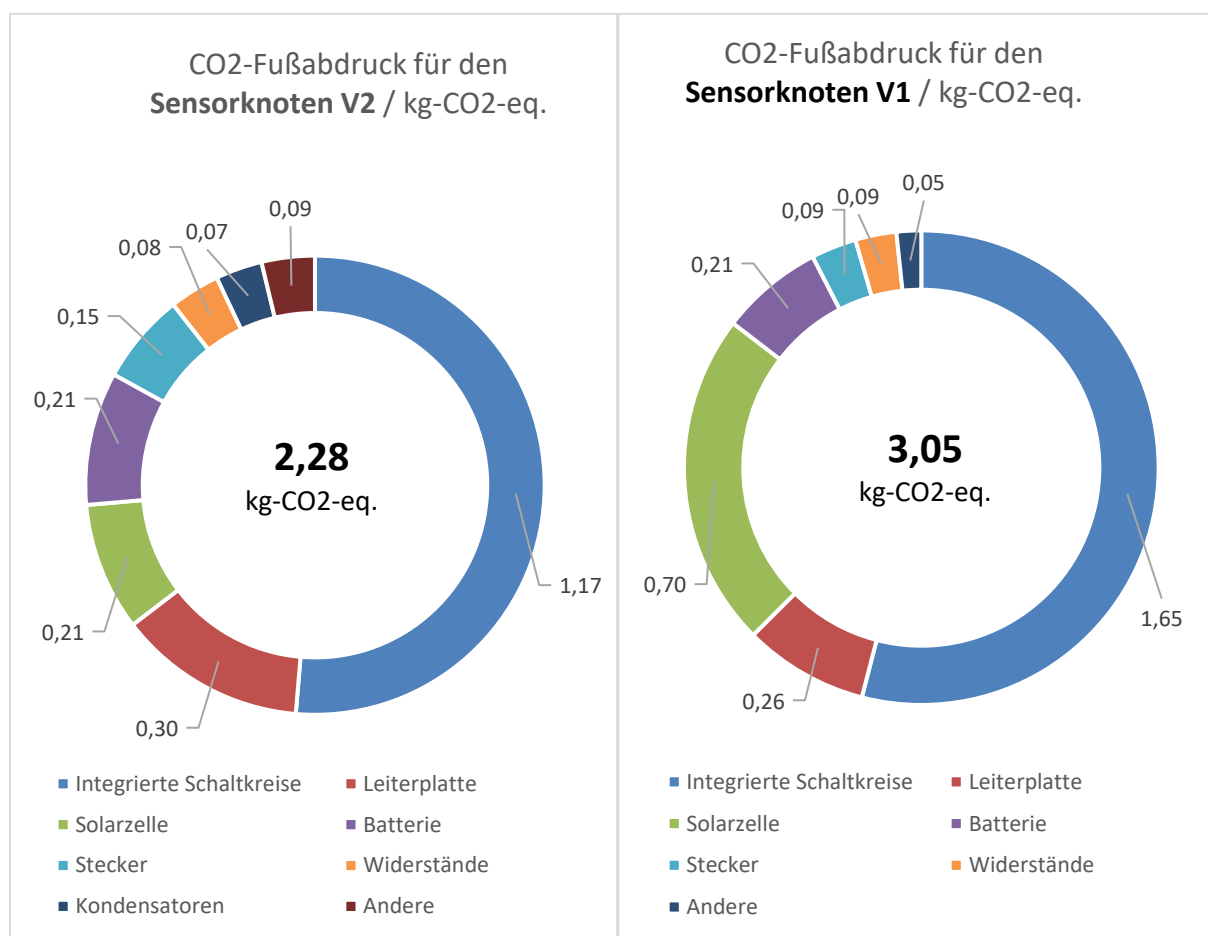


Abbildung 6: CO₂-Fußabdruck für Sensorknoten V2 (links) und Sensorknoten V1 (rechts) nach Komponentengruppen aufgeschlüsselt.

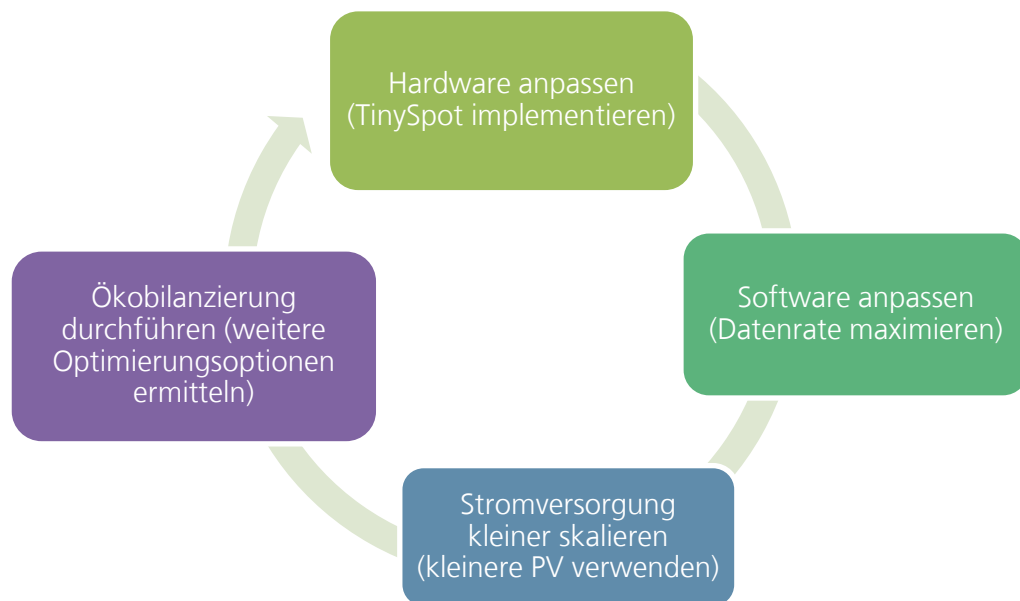


Abbildung 7: Entwicklungskreislauf einer ganzheitlichen IKT

Eine ebenso große Einsparung konnte hinsichtlich der eingesetzten Solarzelle erreicht werden. Die Emissionen während der Herstellung stehen in direkten Zusammenhang mit der physischen Größe der Solarzelle. Diese wiederum steht im direkten Zusammenhang mit der benötigten durchschnittlichen elektrischen Leistung des Sensorknotens. Es ist notwendig die in Abschnitt 3.2 und Abschnitt 3.3 durchgeführten Betrachtungen bezüglich des Energieverbrauchs im Kontext der Hardwareentwicklung aufzugreifen.

Durch die deutlich schnellere Datenübertragung ist das System, das den Fraunhofer IPMS TinySpot einsetzt im Durchschnitt um den Faktor sechs effizienter. Dies ist durch den nächsten Schritt im Entwicklungskreislauf, der Firmware-Anpassung, möglich. Weil softwareseitig ebenfalls eine schnelle Übertragung genutzt wird, wird der energieintensive Systemzustand schneller abgeschlossen und somit weniger Energie benötigt. Aufgrund des geringeren Strombedarfs kann im nächsten Schritt auch die Stromversorgung des Systems um den Faktor sechs, reduziert werden. Daher kann auch die Solarzelle, welche als Stromquelle agiert, um diesen Faktor verkleinert werden. Ein schematischer Größenvergleich ist in Abbildung 8 zu sehen. In diesem Fall verkleinert sich neben den räumlichen Abmessungen auch der CO₂-Fußabdruck deutlich wie in der Aufschlüsselung in Abbildung 6 zu sehen ist. Die Einsparung um 0,51 kg-CO₂-eq. ist für dieses System ein großer Schritt in Richtung nachhaltigerer IKT.



Abbildung 8: Größenvergleich von alter und neuer Sensorplattform

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Fraunhofer IPMS TinySpot durch seine hohe Geschwindigkeit die aktiven Phasen verkürzt und eine Verkleinerung der Energiequellen und/oder Energiespeicher erlaubt. Dies führt zu einem deutlich kleineren Gesamtfußabdruck und einer erheblich verbesserten Ökobilanz für den betrachteten Sensorknoten über den gesamten Lebenszyklus.

Aufbauend auf den in Abschnitt 4 ermittelten Cradle-to-Gate-Effekten lässt sich das Potenzial einer breiten Einführung quantifizieren. Ausgehend von einer Einsparung von 0,77 kg CO₂e je Gerät und einer konservativen Bottom-up-Abschätzung der für optische Links geeigneten Einsatzfelder in Industrie und Anlagenbau ergibt sich in Deutschland ein adressierbarer Bestand von rund 181.000 Geräten. Diese Zahl resultiert aus der Aggregation mehrerer, Funk-kritischer Nischenmärkte: Allein im Maschinen- und Anlagenbau sind über 6.653 Unternehmen tätig [4], die eine große Zahl an rotierenden und elektromagnetisch sensiblen Anlagen betreiben. Hinzu kommen die Chemie- und Pharmaindustrie mit rund 2.000 Betrieben [5], die zahlreiche kritische Ex-Zonen und Reinräume aufweisen, sowie das Gesundheitswesen mit über 1.841 Krankenhäusern (Destatis, "Krankenhäuser in Deutschland"), in deren Operationssälen Funkrestriktionen bestehen. Bei einer angenommenen Mindestausstattung kritischer Bereiche innerhalb dieser Sektoren ergibt sich hieraus das signifikante Gesamtpotenzial von 181.000 Geräten. Würden diese kurzfristig nach dem hier beschriebenen Ansatz ausgelegt oder ersetzt, ergäbe sich eine einmalige Einsparung in der Herstellungsphase von etwa 139 Tonnen CO₂e. Unter Einbezug weiterer Branchen wie Food (Staub-ATEX) und Automotive-Schweißlinien erscheint eine Bandbreite von 140–200 Tonnen CO₂e plausibel. Einsparungen aus der Nutzungsphase (z. B. kleinere Energiespeicher, längere Lebensdauer) sind hier nicht berücksichtigt und erhöhen das Potenzial zusätzlich.

5. Diskussion

Obwohl optische Li-Fi-Schnittstellen vorwiegend in bestimmten Spezialanwendungen eingesetzt werden, ist ein Vergleich mit etablierten Funktechnologien unerlässlich, um ihre jeweiligen Stärken und Schwächen zu verstehen. Funkschnittstellen wie Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah) und BLE haben den entscheidenden Vorteil, dass sie keine direkte Sichtverbindung (Line-of-Sight) benötigen und Wände durchdringen können, was sie für eine Vielzahl von Anwendungen unentbehrlich macht.

Tabelle 2 zeigt den direkten Vergleich zwischen dem Fraunhofer IPMS TinySpot und den funkbasierten Low-Power-Schnittstellen BLE und Wi-Fi HaLow.

Tabelle 2: Vergleich von Li-Fi, BLE 5.0 und 802.11ah hinsichtlich Kernparameter.

<i>Parameter</i>	<i>Li-Fi TinySpot</i>	<i>BLE 5.0</i>	<i>Wi-Fi HaLow (802.11ah)</i>
<i>Medium</i>	Licht (IR)	Funk	Funk
<i>Max. Datenrate (Mbps)</i>	12	2	~1
<i>Reichweite (m)</i>	0,15 to ≥ 1	10-15	1000
<i>Energie pro Bit (nJ/Bit)</i>	1,47	3,5 [6] (nur TX)	27[7]

Wie die Tabelle verdeutlicht, gibt es keine universelle Lösung, sondern jede Technologie hat ihre eigenen Vorteile und Anwendungsszenarien, in denen sie ihre Stärken ausspielen kann. Li-Fi ist in diesem Sinne eine wertvolle Ergänzung zu bestehenden Funktechnologien. Es bietet einzigartige Vorteile in Umgebungen, in denen Funk nicht eingesetzt werden kann, wie unter Wasser oder in industriellen Anlagen mit starken elektromagnetischen Störungen. Die Hauptvorteile von Li-Fi sind die hohe Datenrate und der damit einhergehende niedrige Energieverbrauch pro Bit, eine geringe Latenz und robuste Links mit hoher Zuverlässigkeit aufgrund ihrer geringen Störanfälligkeit gegenüber elektromagnetischen Interferenzen.

Im Gegensatz dazu ist die BLE nicht primär auf eine hohe Datenrate, sondern auf einen extrem niedrigen Sende- und Empfangszyklus ausgelegt. Dies ermöglicht bei Geräten, die den Großteil im stromsparenden Ruhezustand verbringen, eine Batterielaufzeit von mehreren Jahren. Wi-Fi HaLow, dass in Frequenzbändern

unter 1 GHz arbeitet, erreicht eine sehr große Reichweite von einem Kilometer und mehr bei vergleichsweise geringer Datenrate. Dies macht es ideal für großflächige Sensorknoten-Netzwerke, bei denen eine große Distanz überbrückt werden muss.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Zunahme an IoT-Geräten steigt auch der Bedarf an energieeffizienten und zuverlässigen Kommunikationslösungen. Optische Technologien wie Li-Fi sind hier ideal, um diese Anforderungen zu erfüllen, insbesondere in anspruchsvollen Umgebungen, in denen Funktechnologien an ihre Grenzen stoßen. Vor diesem Hintergrund zeigt diese Arbeit, dass die Reduktion des CO₂-Fußabdrucks von IoT-Geräten eine ganzheitliche Betrachtung des gesamten Lebenszyklus erfordert.

Unsere Untersuchungen am Sensorknoten beweisen, dass eine höhere Datenrate zu einem deutlich geringeren Gesamt-CO₂-Fußabdruck führt. Durch den ultra-schnellen TinySpot-Transceiver konnte der durchschnittliche Stromverbrauch so stark gesenkt werden, dass die Solarzelle um den Faktor sechs kleiner dimensioniert werden konnte. Die daraus resultierende Einsparung bei den Herstellungsemissionen der Solarzelle übertraf die zusätzlichen Emissionen des Transceivers bei Weitem, was in Kombination mit anderen Optimierungen zu einer Reduktion des gesamten System-CO₂-Fußabdrucks von 25 % führte.

Der Markt für vernetzte Sensoren in Industrieanwendungen wird in Zukunft stark wachsen, angetrieben durch den Bedarf an Echtzeit-Monitoring und vorausschauender Wartung. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an energieeffiziente und ressourcenschonende Kommunikation. Li-Fi-Lösungen wie TinySpot ermöglichen diese Skalierung bei deutlich geringerem CO₂-Fußabdruck.

7. Finanzierung

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Projekts GreenICT@FMD (FKZ 16ME0501) gefördert.



References

- [1] T. Pirson and D. Bol, "Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach," *Journal of Cleaner Production*, vol. 322, p. 128966, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128966.
- [2] P. Kuppusamy, S. Muthuraj, and S. Gopinath, "Survey and challenges of Li-Fi with comparison of Wi-Fi," in *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Chennai, India, 2016, pp. 896–899.
- [3] F. K. Shaikh, S. Zeadally, and E. Exposito, "Enabling Technologies for Green Internet of Things," *IEEE Systems Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 983–994, 2017, doi: 10.1109/JSYST.2015.2415194.
- [4] Dr. Ralph Wiechers, Florian Scholl, "Maschinenbau in Zahl und Bild 2020," Mühlheim am Main, Apr. 2020. Accessed: Nov. 5 2025. [Online]. Available: <https://www.vdma.eu/documents/34570/0/MbauinZuB2020.pdf>
- [5] Dipl.-Volksw. Christiane Kellermann, "Der Chemie-Mittelstand: Daten und Fakten," VCI, May. 2025. Accessed: Nov. 5 2025. [Online]. Available: <https://www.vci.de/die-branche/berichte-zahlen/chemie-mittelstand.jsp>
- [6] O. Abdelatty *et al.*, "A Low Power Bluetooth Low-Energy Transmitter with a 10.5nJ Startup-Energy Crystal Oscillator," in *ESSCIRC 2019 - IEEE 45th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC)*, Cracow, Poland, 2019, pp. 377–380.
- [7] N. Schärer, T. Polonelli, and M. Magno, "Pushing Wi-Fi HaLow to the Extreme Edge: A Performance Study on a Low-Power IoT Node," in *2025 10th International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI)*, Manfredonia, Italy, 2025, pp. 1–6.