

»GREEN ICT @ FMD« – Kompetenzzentrum für ökologisch nachhaltige IKT

Reduktion des CO₂e Fußabdrucks von Sensor-Edge-Cloud-Systemen zur Zustandsüberwachung

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

Joris Liebermann (Fraunhofer IIS), Volkhard Beyer (Fraunhofer IIS), Martin Lehmann (Fraunhofer IIS), André Schneider (Fraunhofer IIS)



Dieses Whitepaper ist Teil des Projekts „Green ICT @ FMD“ – Kompetenzzentrum für ökologisch nachhaltige Informations- und Kommunikationstechnik. Das Projekt wurde von der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) koordiniert 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, Germany

Ansprechperson
Volkhard Beyer volkhard.beyer@iis.fraunhofer.de

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

Veröffentlicht:
03.03.2026

1. Zusammenfassung

Die Digitalisierung des öffentlichen Raums (Smart City), in Produktionsumgebungen (Industrie 4.0) oder in häuslichen Umgebungen (Smart Home) basiert in den meisten Fällen auf einer kontinuierlichen Zustandsüberwachung von Objekten (z.B. Maschinen und Anlagen) oder Umweltbedingungen. Diese Daten werden über Sensoren erfasst, häufig über ein Gateway oder auch ein Edge-Device gebündelt und letztlich über eine Internetverbindung (z.B. über Funknetze) in der Cloud verarbeitet. Genau diese Systeme tragen einen wichtigen Beitrag zu der Industrie 4.0 bei, indem sie kontinuierliche Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen ermöglichen. Mit der zunehmenden Verbreitung dieser Sensor-Edge-Cloud-Systeme wächst jedoch auch deren ökologischer Fußabdruck (zahlenmäßig in ihrer Klimawirkung ausgedrückt als Einheiten von CO₂-Equivalenten (CO₂e), d.h. der Energiebedarf durch diese Systeme sowohl in der Herstellungs- als in der Nutzungsphase. Bislang finden diese Aspekte aber bei der Systemauslegung kaum Berücksichtigung.

Das vorliegende Whitepaper untersucht daher anhand von zwei Fallstudien die wesentlichen CO₂e -Treiber in Sensor-Edge-Cloud-Ketten und leitet daraus konkrete Handlungsempfehlungen ab. Die erste Fallstudie betrachtet eine im Labor implementierte Lösung zur vibrationsbasierten Werkzeugüberwachung in einer Fräsmaschine, während die zweite Fallstudie ein kommerzielles Asset-Tracking-Modul aus dem industriellen Umfeld analysiert. Der Untersuchungsfokus liegt dabei auf der Datenverarbeitung auf Sensorknoten und Edge-Geräten, da der Cloud-Anteil messtechnisch schwer quantifizierbar ist.

Die Ergebnisse der ersten Fallstudie zeigen, dass durch gezielte Optimierungsmaßnahmen Energieeinsparungen von knapp 50 % in der Gesamtkette realisierbar sind, die linear in CO₂e übertragbar sind. Als größter Hebel erweist sich dabei die Optimierung des Edge-geräts, das einen bis zu 50-fach höheren Energieverbrauch aufweist als der Sensorknoten. Insbesondere der Einsatz schlanker Betriebssysteme sowie das Abschalten ungenutzter Peripherie wie LEDs oder HDMI-Schnittstellen führen zu signifikanten Einsparungen in der Gesamtkette. Auf Kommunikationsebene reduziert lokale Datenvorverarbeitung den Energiebedarf zusätzlich. Bei dem kommerziellen Asset-Tracking-Modul der zweiten Fallstudie sind Energieeinsparungen von bis zu 95 % durch eine Anpassung der Kommunikationsstrategie möglich, indem in stark reduzierten Sendezyklen übertragen wird. Bei dem batteriebetriebenen Gerät sind die Herstellungsemissionen ausschlaggebend für den CO₂e Fußabdruck. Ein energieeffizienter Betrieb verlängert allerdings die Nutzungsdauer, wodurch die Emissionen der Produktionsphase auf mehrere Jahre verteilt werden und rechnerisch der jährliche CO₂e Anteil sinkt.

Die im Rahmen dieser Studie identifizierten Strategien wie anwendungsbezogene Hardwaredimensionierung, Reduktion der Grundlast, frühzeitige Datenverarbeitung und minimierte Kommunikation, sind auf andere IoT-basierten Systeme übertragbar und bieten eine Orientierungshilfe zur systematischen Reduktion des CO₂-Fußabdrucks bei Auslegung und Betrieb von Sensor-Edge-Cloud-Systemen.

2. Einleitung

In der Industrie 4.0 spielt Digitalisierung eine entscheidende Rolle, wobei zunehmend Sensor-Edge-Cloud (SEC) Systeme zur Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen implementiert werden, um vorausschauende Wartung zu realisieren [1], [2]. In typischen Architekturen nimmt ein Sensorknoten die gewünschten Daten auf und ein Edge-Gerät übernimmt die Kommunikation mit der Cloud, zur Speicherung der Daten. Dort erfolgen dann die Weiterverarbeitung, Visualisierung und Auswertung der Daten, um auf den Zustand des überwachten Systems schließen zu können [3]. Mit zunehmender Verbreitung dieser Systeme rückt neben Funktionalität, Latenz und Kosten auch deren ökologischer Fußabdruck in den Fokus. Die anfallenden Emissionen setzen sich im Wesentlichen aus zwei Komponenten zusammen: die CO₂e in der Herstellung und dem CO₂e aus dem laufenden Energieverbrauch in der Nutzungsphase [4], [5]. In der Praxis werden diese Aspekte bei der Auslegung und Anwendung von SEC-Systemen jedoch häufig noch nicht adressiert obwohl bereits einfache Anpassungen messbare Effekte haben könnten.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die wesentlichen CO₂e Treiber in SEC-Ketten anhand zweier Fallstudien zu identifizieren und quantifizieren, um konkrete praxisnahe Optimierungsansätze ableiten zu können. Untersucht werden ein selbst aufgebautes System zur vibrationsbasierten Werkzeugüberwachung an einer Fräsmaschine, sowie ein kommerzielles batteriebetriebenes Asset-Tracking Modul für Füllcontainer. Da der Cloudanteil messtechnisch nicht direkt erfassbar ist, wird dieser nicht bilanziert, der Fokus der Untersuchung liegt auf den Sensorknoten und Edge-Geräten.

Die Studie beschreibt zunächst den Bewertungsrahmen für die CO₂e Bilanzierung der Messobjekte. Im Anschluss werden die zwei Fallstudien dargestellt, bilanziert und ausgewertet. Abschließend werden generelle Beobachtungen zusammengefasst und Handlungsempfehlungen zur Auslegung sowie Betrieb von SEC Ketten abgeleitet und die Grenzen der Untersuchungen diskutiert.

3. Bewertungsrahmen für die Ökobilanzierung

Bei der Untersuchung zur Quantifizierung des CO₂e Fußabdrucks durch SEC-Ketten, sind zwei Beiträge getrennt zu betrachten. Der initiale Anteil der Hardware, welcher bei der Herstellung der Hardwarekomponenten entsteht, und der kontinuierliche Teil, der durch den Energieverbrauch des Geräts laufend CO₂e verursacht. Beide Teile werden getrennt durch unterschiedliche Methoden ermittelt. Die Bilanzierung umfasst dabei den Sensorknoten und das Edge-Gerät, für die Cloud sind sowohl die Hardware als auch der Energieverbrauch messtechnisch schwer erfassbar und auf den Einfluss der SEC Kette zuordbar.

3.1. Bestimmung der Herstellungs CO₂e

Zur Abschätzung der in der Herstellung anfallenden CO₂e-Emissionen wird für jedes betrachtete Messobjekt zunächst eine Stückliste erstellt falls nicht bereits bereitgestellt. Diese beschreibt die wesentlichen Baugruppen und Komponenten wie beispielsweise Leiterplatte, integrierte Schaltungen (ICs), passive Bauelemente oder Batterie und dient als Grundlage einer komponentenbasierten Bilanzierung. Die CO₂e-Abschätzung erfolgte über ein Fraunhofer-internes Bilanzierungstool, das auf Datensätzen der Sphera „LCA for Experts“-Datenbank basiert. Die Komponenten werden dafür in Kategorien eingeteilt und anhand geeigneter Einflussgrößen wie Bauform, Größe, Masse und ähnlichen Kennwerten bewertet. Auf diese Weise kann der Herstellungsfußabdruck auch dann näherungsweise bestimmt werden, wenn keine herstellereinspezifischen Emissionsangaben für einzelne Bauteile vorliegen.

Die Herstellungsbilanzierung ist auf den cradle-to-gate-Umfang beschränkt, es werden somit entstehendes CO₂e bis zum Verlassen des Werkstores berücksichtigt. Nicht enthalten sind alle darauffolgenden Parameter wie Transportwege, Verpackung oder Entsorgung. Die Ergebnisse sind daher als Abschätzung zu verstehen, die insbesondere für die Einordnung von Größenordnungen und die Identifikation dominanter Komponenten geeignet ist.

3.2. CO₂e in der Nutzungsphase

Für die Bestimmung der in der Nutzungsphase entstehenden CO₂e-Emissionen wird der Energieverbrauch der Geräte messtechnisch erfasst und auf das jeweilige Betriebsprofil bezogen. Die Messungen wurden in einer Laborumgebung bei Raumtemperatur durchgeführt. Zur Messung der Leistungsaufnahme kamen abhängig von Gerätetyp zwei verschiedene Messsysteme zum Einsatz: ein kompaktes nordic Power Profiler Kit 2 zur Erfassung von Stromprofilen bei Langzeitmessungen sowie ein präziseres Joulescope J220 Messsystem für detaillierte Leistungsaufnahmen. Letzteres bietet zusätzlich die Möglichkeit einer Strombegrenzung, was zur Vermeidung von Überstrom insbesondere bei der Vermessung von batteriebetriebenen Modulen erforderlich ist.

Die Leistungsaufnahme in realistischen Betriebszuständen, insbesondere bei Edge-Geräten mit Betriebssystem sowie während Kommunikationsereignissen, kann im Zeitverlauf stark schwanken. Daher wird zur Bewertung ein zeitlich gemittelter Leistungswert herangezogen. Hierzu wurden die Messreihen über definierte Messfenster aufgezeichnet und als arithmetischer Mittelwert über die jeweilige Dauer ausgewertet.

Die betriebsbedingten CO₂e-Emissionen aus dem gemessenen Energieverbrauch werden mithilfe eines Emissionsfaktors des Strommixes berechnet, dieser wird in Deutschland mit etwa 0,4 kg CO₂e/kWh angesetzt. Der CO₂e Wert ergibt sich aus der durchschnittlichen Leistungsaufnahme P , der Betriebsdauer t und dem Emissionsfaktor EF durch folgende Formel:

$$CO_2e = P * t * EF$$

Für die Gesamtbetrachtung wird die Betriebsdauer des jeweiligen Anwendungsfall miteinbezogen um einen absoluten Einsparungswert bestimmen zu können.

4. Fallstudie 1: Fräsmaschinenüberwachung im Labor

4.1. Systembeschreibung

In der ersten Fallstudie wurde der Anwendungsfall einer vibrationsbasierten Zustandsüberwachung eines Fräsmaschinen-Werkzeugs betrachtet. Ziel ist es, aus Schwingungsdaten Rückschlüsse auf den Werkzeugzustand beziehungsweise auf Verschleißzustände zu ziehen und damit eine vorausschauende Instandhaltung zu unterstützen. Für die Untersuchung wurde eine entsprechende SEC-Kette im Labor aufgebaut und über definierte Betriebszustände messtechnisch charakterisiert.

Die Architektur des Systems folgt dem typischen SEC Muster und ist in *Abbildung 1* dargestellt. Als Sensorknoten dient ein Mikrocontrollerboard mit Schwingungssensor, das über Bluetooth Low Energy (BLE) die Vibrationsdaten sendet. Das Edge-Gerät empfängt diese Daten und sendet sie per WLAN mittels MQTT an die Cloud weiter. Die Cloud wurde primär zur Vollständigkeit der Übertragungskette implementiert, von dort aus konnten die Daten ausgelesen, visualisiert und ausgewertet werden. Zur Bilanzierung wurde ein konservatives Worst-Case-Betriebsprofil angenommen, in dem die Anlage durchgehend läuft, dementsprechend 24 h am Tag alle 7 Tage die Woche kontinuierliche Messungen durchgeführt werden.

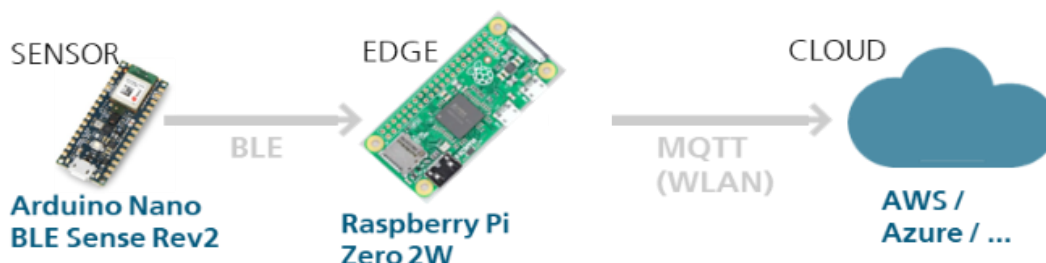


Abbildung 1: Architektur der Sensor-Edge-Cloud Kette im Labor zu vibrationsbasierten Zustandsüberwachung eines Fräswerkzeugs

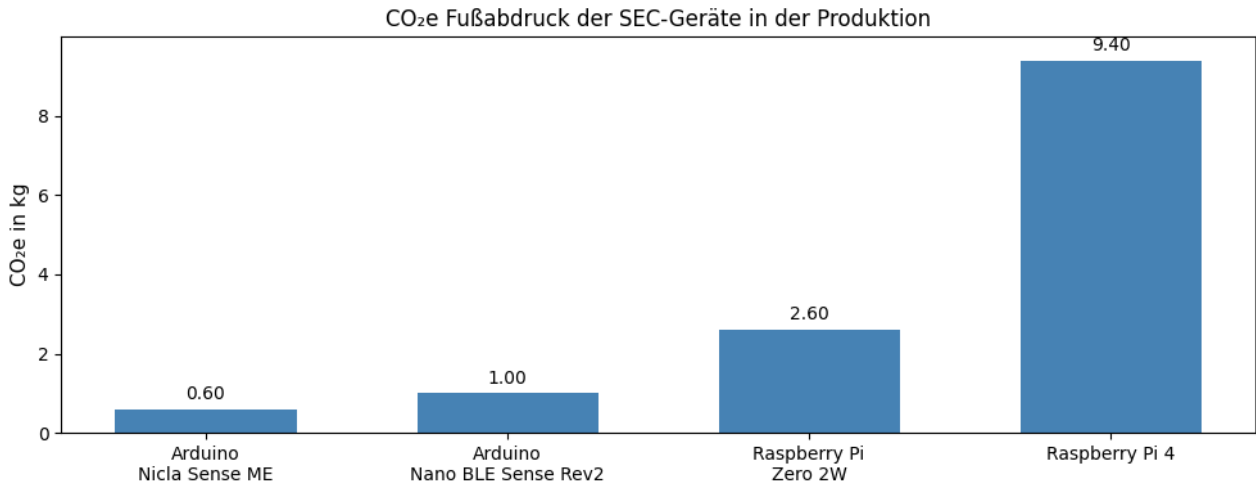


Abbildung 2: CO₂e Fußabdruck in der Produktion von je zwei Sensorknoten und Edge-Geräten

4.2. Herstellungs-CO₂e

Für die Zustandsüberwachung wurden als Sensorknoten ein Arduino Nano 33 BLE Sense Rev2 und als Edge-Gerät ein Raspberry Pi Zero 2W ausgewählt, beide verfügen über technische Spezifikationen um die Anforderungen für den Anwendungsfall zu erfüllen. Um eine Vergleichbarkeit zu bekommen wurden als weiterer Sensorknoten ein Arduino Nicla Sense ME bilanziert, sowie ein Raspberry Pi 4 als alternatives Edge-Gerät.

In Abbildung 2 ist der CO₂e Fußabdruck der Sensorknoten und Edge-Geräte der SEC Kette dargestellt. Die Sensorknoten verursachen mit 0,6 kg (Nicla Sense ME) und 1,0 kg (Nano BLE Sense Rev2) deutlich weniger Emissionen als die Edge Geräte mit 2,6 kg (Pi Zero 2W) und 9,4 kg (Pi 4). Dieser Unterschied scheint aufgrund des unterschiedlichen Größenfaktors und der höheren Komplexität plausibel. In allen untersuchten Fällen war ein geringerer Formfaktor auch mit weniger CO₂e verbunden.

In Abbildung 3 ist der Anteil der Komponenten zu dem CO₂e Fußabdruck der beiden Sensorknoten aufgeschlüsselt. In beiden Fällen ist der Anteil der Leiterplatte (PCB) dominant und beträgt 86% beim Nicla Sense ME und 78% beim Nano BLE Sense, gefolgt von den Chips (ICs) mit je 13%. Die restlichen Komponenten-kategorien sind bei Einzelanteil <5% der Übersichtlichkeit halber in eine Kategorie zusammengefasst.

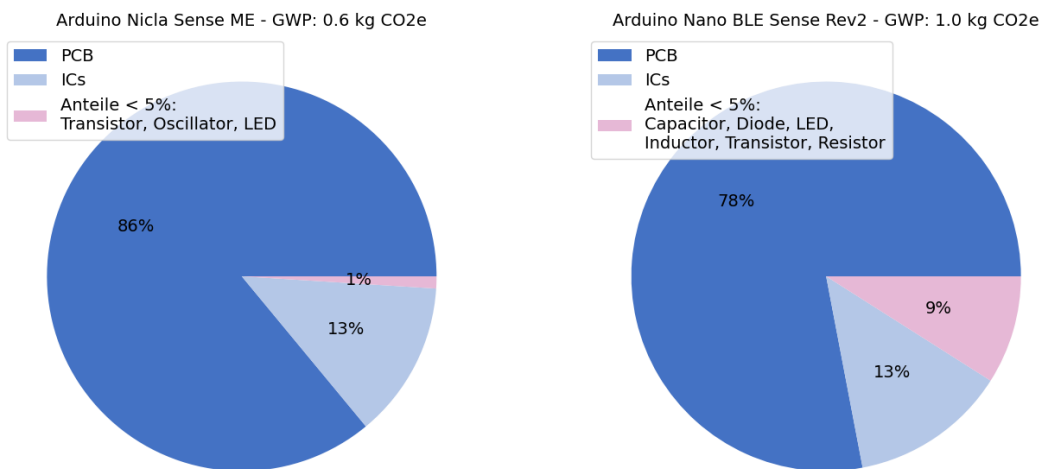


Abbildung 3: Vergleich Komponentenanteil des CO₂e von Arduino Nicla Sense ME (links) zu Arduino Nano BLE Sense Rev2 (rechts)

4.3. Nutzungsphase

Zur Bestimmung der betriebsbedingten CO₂e Emissionen wurde zunächst die Leistungsaufnahme der eingesetzten Geräte untersucht. Hierbei lassen sich Einzelbetrachtung und Gesamtsystem unterscheiden. In der Einzelbetrachtung werden die Messobjekte jeweils unabhängig voneinander systematisch vermessen, also noch nicht in der Endanwendung betrachtet. Der Zweck dieses Vorgehens ist es zunächst isoliert die Einflüsse der verschiedenen Konfigurationen zu identifizieren ohne bereits viele verschiedene Abhängigkeiten zu haben. In der Untersuchung des Gesamtsystems wird die SEC Kette als Einheit betrachtet und entsprechende Ableitungen aus der vorherigen Einzelbetrachtung implementiert um deren Einfluss auf das Gesamtsystem zu vermessen.

Einzelbetrachtung des Sensorknotens und der Edge-Komponente

Der Sensorknoten bietet verschiedene Ansatzpunkte zur Optimierung der Leistungsaufnahme. Sie lassen sich einteilen in Abschalten von Peripherie, Einstellungen am Mikrocontroller und Konfigurationen des Beschleunigungssensors. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in *Abbildung 4* dargestellt. Die ursprüngliche Leistungsaufnahme ohne Optimierung betrug im Schlafmodus 13,5mW und während der Datenerfassung 35,5mW bei einer Abtastrate des Beschleunigungssensors von 200 Hz. Abschalten der Power LED hat in beiden Fällen zu einer Leistungsreduktion von etwa 10mW geführt. Die Nutzung des verbauten Abwärtswandlers statt des Low-Dropout-Reglers (LDO) führte zu einer Leistungsreduktion von 25-45 %. Die verschiedenen Möglichkeiten am Sensorelement selbst über Energiespar-Modi und Filter Optimierungen vorzunehmen, zeigten kaum Einfluss auf die Leistungsaufnahme, ebenso die Abschaltung der seriellen Kommunikation.

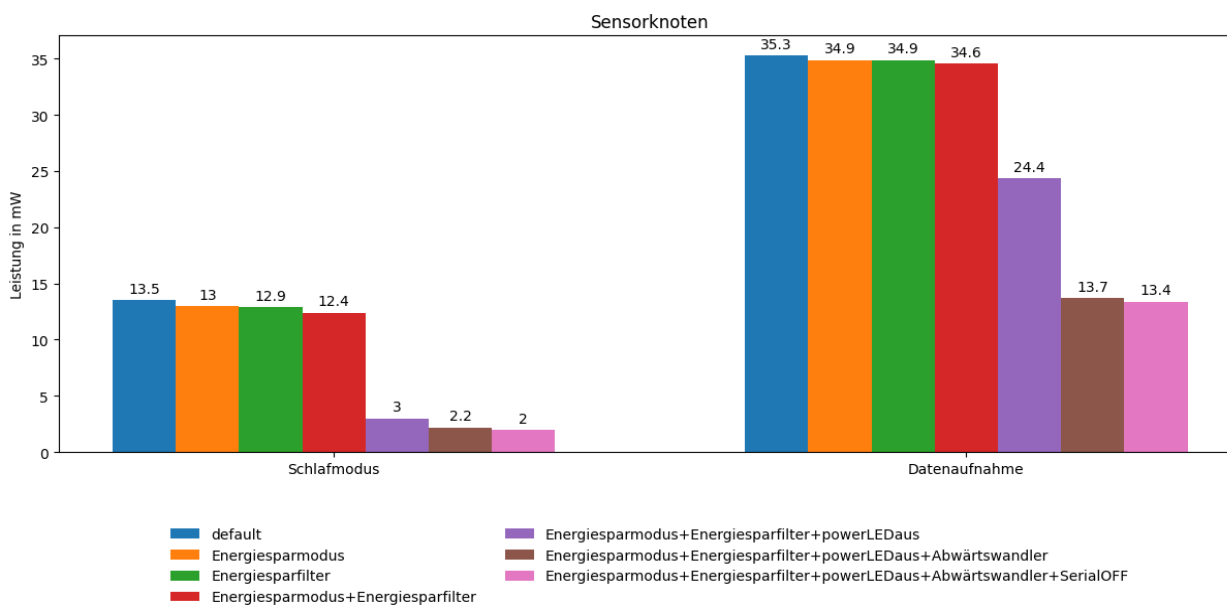


Abbildung 4: Leistungsaufnahme des Sensorknotens für verschiedene Konfigurationen im Schlafmodus und bei der Datenaufnahme

Der Raspberry Pi Zero 2W ist wegen seines Betriebssystems komplexer und weniger deterministisch. Wesentliche Möglichkeiten waren Abschalten von HDMI Port und LED. Des Weiteren wurde eine Firmware namens DietPi getestet [6]. Diese ist auf den Betrieb ohne graphische Oberfläche optimiert (headless) und kann als minimalistisches Betriebssystem gesehen werden, bei dem nur die notwendigsten Hintergrunddienste laufen. Jegliche Tests wurden im Leerlauf durchgeführt, d.h. das Edge-Gerät war angeschaltet aber ohne aktive Operationen auszuführen. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme war bei etwa 1100mW. Die Abschaltung der LED brachte eine Leistungseinsparung von 20mW, während es beim HDMI Port 170 mW waren. Die DietPi Firmware verringerte den Verbrauch um insgesamt 250 mW auf 850mW, wobei die Abschaltung von LED und HDMI Port bereits betriebssystemseitig implementiert ist (kein zusätzlicher Effekt).

SEC Gesamtsystem

Bei der Betrachtung der Gesamtkette wurden die Energieverbräuche beider Komponenten (Edge und Sensor) parallel über zwei PPK2-Messgeräte erfasst und in den folgenden Betrachtungen addiert.

Eine Datenvorverarbeitung kann grundsätzlich sowohl auf der Edge als auch auf dem Sensor erfolgen. Die Verortung der Rechenoperationen entlang der SEC-Kette beeinflusst den Energieverbrauch in mehrerlei Hinsicht; eine Energiekostenänderung wird sowohl durch Rechenoperationen der Vorverarbeitung verursacht als auch durch die reduzierte Datenmenge an Sender und Empfänger.

Um die Auswirkung einer sensornahen Datenvorverarbeitung auf die Leistungsaufnahme zu untersuchen, wurde Rohdaten-Streaming als Referenz mit einer Klassifikation über neuronale Netze auf dem Sensorknoten verglichen. Hierbei wurde eine Sensorabtastrate von 1600 Hz genutzt, da dies die Genauigkeit der Klassifikationsergebnisse erhöht. Um betriebssystemabhängige Schwankungen der Leistungsaufnahme an der Edge auszugleichen, wurden Messwerte über längere Zeiträume erfasst und das arithmetische Mittel gebildet.

Die DietPi-Firmware wurde als einflussreichster Faktor identifiziert, wobei die Einsparungen unter Last bis zu 800 mW betragen. Die Klassifikation auf dem Sensor konnte die Leistungsaufnahme des Edge-Geräts weiter auf 1150 mW reduzieren, während der Sensorknoten keine deutliche Veränderung zeigte (etwa 47 mW für Rohdaten-Stream und Klassifikation).

Die Leistungsaufnahme des Edge-Geräts übersteigt die des Sensorknotens fast um das Fünzigfache (2200 mW gegenüber 47 mW), daher wirkten sich Sensor-Optimierungen auf die Gesamtkette nur geringfügig aus und wurden in den folgenden Rechnungen vernachlässigt. Für das Gesamtsystem ergibt sich eine Reduktion der Leistungsaufnahme um 47 % von 2,25 W auf 1,20 W, was einer Leistungseinsparung von 1,05 W entspricht. Alle genannten Optimierungsmaßnahmen sind in *Tabelle 1* übersichtlich für die verschiedenen Betrachtungsfälle zusammengefasst.

Tabelle 1: Optimierungsmaßnahmen zur Leistungseinsparung bei Sensor, Edge und Gesamtkette

Optimierung	Komponente	Einsparung
LED aus	Sensor	10 mW
Abwärtswandler statt LDO	Sensor	25–45 % (leistungsabhängig)
HDMI aus	Edge (Leerlauf)	170 mW
Edge-LED aus	Edge (Leerlauf)	20 mW
Headless Firmware (DietPi)	Edge (Leerlauf)	250 mW
Klassifikation auf Sensor statt Cloud	Gesamtkette (unter Last)	250 mW
Headless Firmware (DietPi)	Gesamtkette (unter Last)	800 mW

4.4. CO₂e-Wirkung

Aus den untersuchten Optimierungsmaßnahmen (Betriebssystem und Klassifikation auf Sensorknoten) lässt sich die Energieeinsparung in CO₂e direkt aus der Reduktion der mittleren Leistungsaufnahme der SEC Kette und dem angenommenen Betriebsprofil ableiten. Als Bezugsgröße wird ein Dauerbetrieb (d.h. 24 h/Tag, 365 Tage/Jahr) für die Nutzung der Zustandsüberwachungselektronik angenommen. Bei dieser Rechnung werden pro Jahr 9,2 kWh eingespart, was einem CO₂e von knapp 3,7 kg entspricht. Bei einer Standardnutzungsdauer von 5 Jahren würden durch den effizienteren Betrieb 18,4 kg CO₂e eingespart werden.

Vergleicht man von der Gesamtkette den CO₂e der Komponentenherstellung (3,6 kg) mit der Nutzungsphase (38,5 kg auf 5 Jahre), wird deutlich, dass der Energieverbrauch bereits ab dem 1. Jahr der ausschlaggebende Emissionstreiber in dem betrachteten SEC System darstellt.

4.5. Lessons learned

Die Messergebnisse der Labor-SEC-Kette zeigen, dass in der betrachteten Architektur das Edge-Gerät den Energieverbrauch der Gesamtkette und damit die betriebsbedingten CO₂e-Emissionen eindeutig dominiert. Während der Sensorknoten im mW-Bereich arbeitet, liegt die Leistungsaufnahme des Edge-Geräts im Watt-Bereich, sodass Optimierungen auf Edge-Seite den größten systemischen Hebel darstellen. Entscheidend ist dabei weniger der momentane Rechenbedarf einzelner Algorithmen als die dauerhaft anliegende Grundlast des Edge-Geräts, die in kontinuierlich betriebenen Zustandsüberwachungsanwendungen unmittelbar in Energie- und CO₂e-Menge übersetzt wird. Daraus folgt, dass die Auswahl und Dimensionierung der Edge-Hardware sowie die konsequente Reduktion unnötiger Systemdienste bereits in der Entwurfsphase berücksichtigt werden sollten. Der größte Hebel zur Energieeinsparung bestünde darin, die Edge-Ebene vollständig zu umgehen und den Sensorknoten direkt an die Cloud anzubinden, insofern der Anwendungsfall dies zulässt.

Als besonders wirksam haben sich Maßnahmen erwiesen, die ohne funktionale Einschränkungen die Grundlast reduzieren. Dazu zählen das Abschalten ungenutzter Peripherie wie HDMI-Ausgang und Status-LEDs sowie der Betrieb des Edge-Geräts in einer headless Konfiguration. Hierbei hat sich das Betriebssystem als zentraler Einflussfaktor bestätigt: Ein minimalistisches Betriebssystem mit reduzierten Hintergrunddiensten senkt nicht nur den Leerlaufverbrauch, sondern wirkt insbesondere unter Last, da weniger Hintergrundaktivität zu niedrigeren Leistungsaufnahmen führen. In der Gesamtsystembetrachtung war diese Service-Minimierung in Kombination mit Peripherieabschaltung der wesentliche Treiber für die beobachtete Reduktion der Leistungsaufnahme der SEC-Kette.

Neben der Grundlastreduktion beeinflusst der Ort der Datenverarbeitung den Energiebedarf der Kette maßgeblich. Eine frühe Vorverarbeitung der Messdaten, etwa durch Klassifikation auf Sensorebene, reduziert das zu übertragende Datenvolumen und senkt damit den Kommunikationsaufwand. Dieser Effekt ist besonders relevant, wenn Rohdatenstreaming große Datenraten erzeugt und der Energiebedarf der Funkübertragung gegenüber lokalen Rechenoperationen dominiert.

5. Fallstudie 2: CO₂ Fußabdruck eines Asset Tracking Moduls

5.1. Systembeschreibung

In der zweiten Fallstudie wird ein kommerzielles, batteriebetriebenes IoT-Modul („Smartcap“ der Firma Packwise) Sensorknoten und Edge in einem Gerät vereint [7]. Das Modul wird an z.B. an wieder befüllbaren Chemiecontainern fixiert und dient der Zustandsüberwachung des Transportbehälters. Anders als bei der SEC-Kette im Labor aus der ersten Fallstudie handelt es sich hier um ein weitgehend geschlossenes System, bei dem Hardware und Firmware fest definiert sind und Optimierungen primär über konfigurierbare Betriebsparameter erfolgen können. Das untersuchte Modul verfügt über Sensorik zur Erfassung von Temperatur, Beschleunigung und Füllstand sowie eine Mobilfunkanbindung zur direkten Übertragung der Messdaten in eine Cloudplattform. Über diese Plattform werden sowohl der Datenzugriff als auch die Gerätekonfiguration gesteuert.

Die Randbedingungen des Systems beeinflussen die Bilanzierung in der Nutzungsphase maßgeblich. Die Batterie ist nicht wiederaufladbar oder austauschbar; damit entstehen während des Betriebs keine direkten Emissionen, der Energieverbrauch wirkt sich vielmehr indirekt über die erreichbare Gerätelebensdauer aus. Ist die Batterie erschöpft, muss für weitere Überwachung ein neues Gerät eingesetzt werden, dessen Herstellung erneut den CO₂-Fußabdruck für die Technologielösung erhöht.

5.2. CO₂e aus der Herstellungsphase

Der CO₂-Fußabdruck wurde aus der Stückliste des Herstellers abgeleitet. Für das Modul ergibt sich dabei ein Herstellungsfußabdruck von 8,7 kg CO₂e. *Abbildung 5 (links)* stellt in einem Diagramm die Aufschlüsselung der Emissionen auf die unterschiedlichen Komponentenkategorien dar. Die Batterie ist hierbei mit 32 % der größte Einzelposten, gefolgt von ICs (31 %) und der Leiterplatte (27 %). Sonstige Komponenten wie passive oder mechanische Bauelemente liegen zusammen bei einem Anteil von ca. 9 %.

Abbildung 5 (rechts) zeigt außerdem durch welche Komponenten die IC-Emissionen hauptsächlich entstehen. Den größten Anteil stellen die Mobilfunkkomponenten (Kommunikationsmodul und eSIM) mit rund 46%, insgesamt etwa 1,3 kg CO₂e. Die verbaute Sensorik verursacht mit etwa 25% den nächstgrößten Anteil, während Mikrocontroller und Power Management jeweils etwa 11% beitragen. Die kleinste Kategorie besteht aus den restlichen Bauteilen mit etwa 6% in der Logik und Signalverarbeitung.

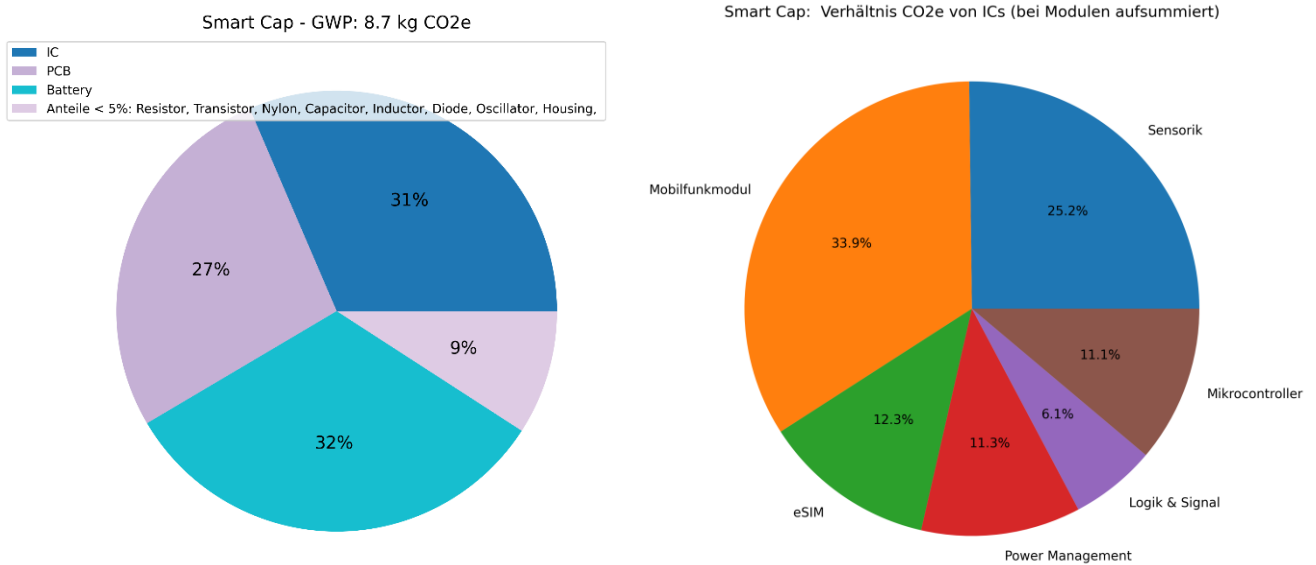


Abbildung 5: CO₂e Fußabdruck des IoT Moduls. Links: Aufschlüsselung des Gesamt- CO₂e auf verschiedene Kategorien wie ICs, Leiterplatte, Batterie und Rest. Rechts: Anteile der verschiedenen ICs

5.3. Nutzungsphase

Da das Modul keinen Netzstrom bezieht, werden für die Nutzungsphase keine zusätzlichen, verbrauchsbedingten CO₂e-Emissionen am Einsatzort bilanziert. Der Energiebedarf des Geräts ist dennoch entscheidend, da er die erreichbare Batterielebensdauer und damit die Austauschhäufigkeit bestimmt. Ist die Batterie leer, muss für eine fortgesetzte Überwachung ein neues Gerät eingesetzt werden, wodurch die Herstellungs-CO₂e erneut anfallen. Um unterschiedliche Betriebsstrategien vergleichbar zu machen, wird dieser Effekt über die erwartete Lebensdauer auf eine jährliche CO₂e-Emission umgelegt, indem die Herstellungs-CO₂e Emissionen durch die geschätzte Lebensdauer auf die Nutzungsjahre aufgeteilt wird.

Zur Einordnung der Einflussgrößen werden Herstellerangaben zur Batterielaufzeit als Referenz herangezogen. Packwise weist darauf hin, dass die Laufzeit insbesondere von aktivierten Funktionen, der Anzahl der Mess- und Sendezyklen, der Mobilfunkverbindung (Verfügbarkeit und Signalstärke) sowie der Umgebungstemperatur abhängt. Als Richtwerte werden abhängig vom Sendeintervall Laufzeiten von 10,7 Jahren (tägliche Übertragung), 4,3 Jahren (drei Übertragungen pro Tag, alle 8 h) und 2 Jahren (sechs Übertragungen pro Tag, alle 4h) angegeben. Diese Angaben dienen im Folgenden als Plausibilitätsrahmen, da Funkbedingungen und Temperatur den Energieverbrauch beeinflussen und im Feld stark variieren können.

Die vorgenommenen Energiemessungen an dem Modul zeigen im stationären Laborbetrieb eine Ruheleistung von etwa 0,1 mW. Entsprechend beträgt der minimale tägliche Energieverbrauch rund 2,4 mWh. Der zusätzliche Energiebedarf entsteht ereignisbezogen durch Mess- und insbesondere Sendezyklen. Während der Mobilfunkkommunikation traten deutliche Schwankungen auf, weshalb die angegebenen Werte als Mittelwerte über wiederholte Zyklen ausgewertet wurden. Ein Sendezyklus in der Standardkonfiguration inklusive Füllstandsmessung benötigt etwa 9 mWh, ohne Füllstandsmessung etwa 6,5 mWh. Zusätzliche Messzyklen zwischen den Sendungen liegen mit rund 2,5 mWh pro Messung deutlich darunter.

Abbildung 6 zeigt den Energieverbrauch pro Tag für verschiedene Sendeintervalle, aufgeteilt in die Anteile für den Grundverbrauch, Funk und die Füllstandsmessung. Alle Messungen wurden im ruhenden Zustand durchgeführt. In realen Einsatzszenarien könnten Bewegungen durch unterschiedliche Positionierungsmethoden, wie GPS statt WLAN-basierter Standortschätzung, zusätzliche Funkaktivität auslösen und den Energieverbrauch erhöhen.

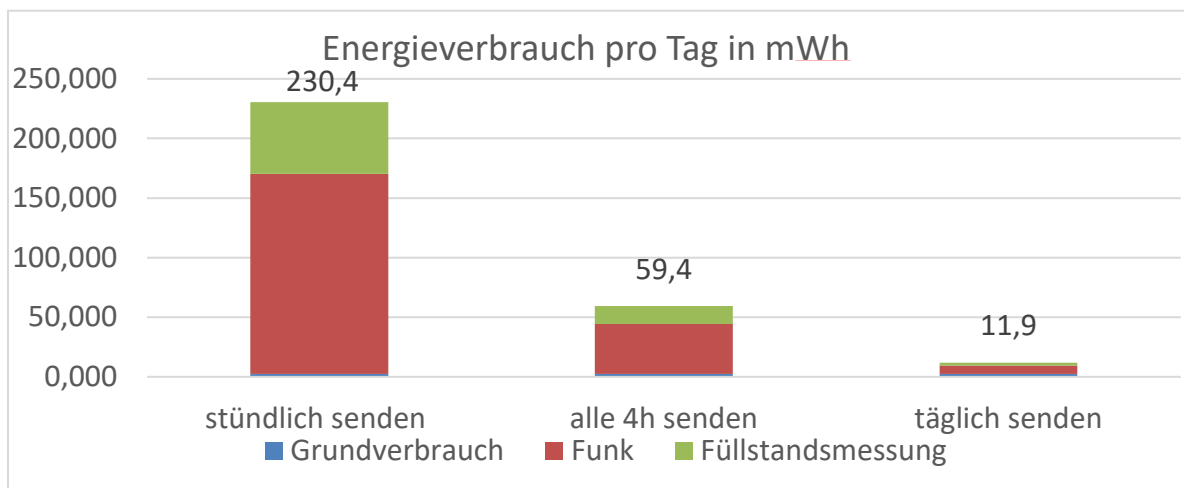


Abbildung 6: Energieverbrauch pro Tag in mWh des IoT Moduls für verschiedene Sendeintervalle

5.4. CO₂e-Wirkung

In *Tabelle 2* wurden auf Basis der gemessenen Energieverbräuche für die verschiedenen Betriebsprofile die jeweiligen Lebensdauer abgeleitet und die Herstellungsemissionen entsprechend auf jährliche CO₂e Emissionen umgelegt. Bei stündlicher Übertragung resultiert eine erwartete Lebensdauer von 0,8 Jahren und damit eine jährliche Emission von 10,8 kg CO₂e. Bei einem 4-h-Intervall beträgt die Lebensdauer 3,5 Jahre (2,5 kg CO₂e/Jahr), bei täglicher Übertragung 15,7 Jahre (0,6 kg CO₂e/Jahr). Bei einem Sendeintervall von 4h ohne Füllstandsmessung reduzieren sich die CO₂e bereits um 28 % auf nur 1,8 kg/Jahr. Eine ähnliche Einsparung wird durch die Aggregation der Messwerte alle 4h erzielt, wenn die Daten nur einmal am Tag ausgesendet werden statt regelmäßig unmittelbar nach der Aufnahme. Vergleicht man die Emissionen bei stündlichem Sendeintervall mit täglichem Senden, ergibt das eine Emissionsreduktion von 95 %.

Die Abweichungen bei der Lebensdauer zu den Herstellerprognosen sind plausibel, da Funkbedingungen (Mobilfunkverfügbarkeit, Signalstärke), Temperatur sowie bewegungsinduzierte Ereignisse (unterschiedliche Positionsbestimmungen, GPS oder WLAN-basierte Standortsschätzung) den Energiebedarf erhöhen können, während die vorliegenden Messungen ein stationäres Laborprofil abbilden. Zusätzlich wurde in der Untersuchung keine Selbstentladung oder Alterung der Batterie berücksichtigt.

Tabelle 2: Lebensdauer und jährliche CO₂e Emission des IoT-Moduls bei unterschiedlichen Betriebsprofilen

Sendungsintervall	Lebensdauer [Jahre]	CO ₂ e Emission [kg/Jahr]
Stündlich	0,8	10,8
Alle 4h	3,5	2,5
Täglich	15,7	0,6
Alle 4h (ohne Füllstandsmessung)	4,8	1,8
Täglich (aggregierte Messung alle 4h)	4,7	1,8

5.5. Lessons learned

Bei dem batteriebetriebenen, mobilfunkbasierten Asset-Tracking-System entsteht die CO₂e Einsparung des Betriebs primär über die Erhöhung der Lebens- bzw. Nutzungsdauer und damit über die Austauschrate des Geräts, nicht über direkt bilanzierten Netzstromverbrauch. Mobilfunkübertragungen stellen bei der Nutzung dabei den energetisch dominierenden Anteil dar, die Sendehäufigkeit ist folglich der verlässlichste Stellhebel zur Lebensdauererlängerung und zur Reduktion des jährlichen Beitrags aus der Herstellung zu den CO₂e. Besonders wirksam sind Strategien, welche die Anzahl von Übertragungen reduzieren, was auch ohne Verlust von

Informationsgehalt möglich ist, etwa durch die Aggregation mehrerer Messungen pro Sendung oder eine ereignisbasierte Übertragung. Funktionen wie die Füllstandsmessung beeinflussen zusätzlich den Energiebedarf pro Übertragung und sollten, sofern es der Anwendungsfall erlaubt, bewusst dimensioniert und konfiguriert werden. Das gleiche Prinzip steckt hinter der Verwendung von Alarmen: wenn nur Informationen gesendet werden bei relevanten Änderungen wie veränderter Position oder dem Überschreiten von Temperatur- oder Schockschwellwerten, kann auf häufiges Senden von redundanter Information verzichtet werden.

Zudem bestehen weitere Optimierungsmöglichkeiten auf Ebene des Systemdesigns. Eine lokale Verarbeitung der Rohdaten auf dem Gerät zur Bestimmung der Füllstandshöhe würde es auch erlauben, bei signifikanter Änderung des Containerfüllstandes einen Alarm abzuschicken. Zusätzlich würde das die Datenkommunikation und somit den Energieaufwand pro Messwertsendung reduzieren. Ergänzend würde auch ein kompakteres Leiterplattendesign zu einer weiteren Reduktion der CO₂e aus dem Herstellungsanteil beitragen. Ebenso denkbar wäre die Nutzung eines Energie-Harvesters zur Verlängerung der Nutzungsdauer oder zur Verkleinerung der Batterie.

6. Handlungsempfehlungen zur Reduktion des CO₂e-Fußabdrucks

Die beiden Fallstudien verdeutlichen, dass die wirksamsten Hebel zur Reduktion des CO₂e Fußabdrucks stark vom Systemtyp abhängen. In der netzgebundenen SEC-Kette wird der CO₂e-Fußabdruck durch den Energieverbrauch in der Nutzungsphase bestimmt, während bei dem batteriebetriebenen, nicht wartbaren IoT Modul die Herstellungsemissionen dominieren und der Betrieb vor allem über die Lebensdauer auf die jährliche CO₂e-Zuordnung wirkt. Zur Reduktion von CO₂e in SEC Systemen müssen die jeweiligen Optimierungsansätze immer auf den entsprechenden Anwendungsfall angepasst sein.

Überwiegt der Emissionsanteil durch den Energieverbrauch in der Nutzungsphase, ist die Reduktion der Grundlast zentral. In der Labor-SEC-Kette war die Edge-Komponente der dominante Verbraucher, weil sie dauerhaft im Watt-Bereich betrieben wird, während der Sensorknoten im mW-Bereich liegt. Daraus folgt, dass die Auswahl und Dimensionierung der Edge-Plattform in der Entwurfsphase ein primärer Einflussfaktor für die entstehenden CO₂e Emissionen ist - bei geeigneten Rahmenbedingungen sollte daher eine energieeffiziente Edge-Plattform gewählt werden. Ist hierbei ein Linux-basiertes System im Einsatz, sind dauerhaft laufende Hintergrunddienste ein ausschlaggebender Verbraucher und sollten durch den Betrieb in headless-Konfiguration mit minimalen Hintergrunddiensten und Deaktivierung nicht benötigter Peripherie optimiert werden.

Auf Sensorknotenebene sind Optimierungen vor allem dann relevant, wenn sie ohne Funktionsverlust die Basisaufnahme senken oder die Energieversorgung effizienter gestalten. Die erste Fallstudie legt nahe, dass Abschaltung der LED und Wahl des Spannungswandlers häufig mehr Hebel bietet als Konfigurationen am Sensorelement. Gleichzeitig ist zu erwarten, dass sensornahe Optimierungen im Gesamtsystem häufig nachrangig sind, sobald ein dauerhaft betriebenes Edge-Gerät in der Kette enthalten ist.

Die Kommunikationsstrategie ist ein weiterer entscheidender Einflussfaktor für die energieeffiziente und ressourcenbewusste Nutzung der SEC Kette. Da Datenkommunikation mit einem erheblichen Energieaufwand verbunden ist, sollte sie auf ein Minimum beschränkt werden. Eine frühzeitige Datenverarbeitung verringert nicht nur den zu übertragenden Datenstrom und die dafür notwendige Energie, sondern ermöglicht auch die Nutzung von ereignisgetriebener Kommunikation, wodurch nur nicht-redundante Informationen übertragen werden könnten. Je nach Anwendungsfall ist bereits durch Aggregation von Messdaten und dem Übertragen in längeren Sendeintervallen eine Möglichkeit signifikante Energieeinsparungen ohne Informationsverlust zu realisieren.

Über beide Anwendungsfälle hinweg lassen sich damit folgende Leitlinien formulieren: Die Plattformwahl und Dimensionierung ist entlang des tatsächlichen Bedarfs zu treffen, da Überdimensionierung Herstellungs- und Nutzungsanteile erhöht. Die Grundlast ist konsequent zu minimieren über Maßnahmen wie Peripherie- und Service-Reduktion, insbesondere auf Edge-Systemen. Des Weiteren sollte die Kommunikation auf das notwendige Maß reduziert werden, vorzugsweise zustands- oder ereignisgetrieben, was vor allem durch frühzeitige Datenverarbeitung unterstützt wird. Diese Prinzipien sind breit übertragbar, müssen jedoch gegen Anforderungen wie Informationsbedarf und Systembeschränkungen abgewogen werden.

7. Diskussion

In dieser Arbeit wurden Herstellungs- und Nutzungsbeiträge des CO₂e für Sensorknoten und Edge-Geräte bilanziert. Der Cloud-Anteil wurde nicht berücksichtigt, da eine belastbare messtechnische Erfassung und eine eindeutige Zuordnung in geteilten Cloud-Infrastrukturen nur eingeschränkt möglich ist. Gleichzeitig ist plausibel, dass die in beiden Fallstudien untersuchten Maßnahmen zur Datenreduktion auch cloudseitig Einsparungen bewirken, da weniger Daten übertragen, gespeichert und verarbeitet werden. Die ausgewiesenen CO₂e-Werte sind daher als Teilbilanz zu interpretieren.

Die Herstellungs-CO₂e wurden komponentenbasiert im cradle-to-gate-Umfang abgeschätzt und dienen vor allem der Einordnung von Größenordnungen sowie der Identifikation dominanter Baugruppen. Weder lagen herstellerepezifische Prozessdaten vor, noch wurden Transport, Verpackung und End-of-Life einberechnet. Damit sind die absoluten Werte mit Unsicherheiten behaftet, die relativen Beiträge zentraler Kategorien (wie Batterie, ICs, Leiterplatte) bleiben jedoch als Orientierung für Designentscheidungen nutzbar.

Für die Nutzungsphase wurden Leistungsaufnahmen unter Laborbedingungen gemessen und auf vereinfachte Betriebsprofile übertragen. In realen Anwendungen können Temperatur, Funkbedingungen und anwendungsspezifische Aktivitätsmuster die mittlere Leistungsaufnahme deutlich verändern. Dies gilt insbesondere für mobilfunkbasierte Systeme, bei denen Signalstärke, Netzverfügbarkeit und Wiederholendungen den Energiebedarf pro Übertragung stark beeinflussen können. Die abgeleiteten absoluten Jahreswerte sind daher als Einordnung zu verstehen, während die dominierenden Einflussgrößen und Optimierungsansätze übertragbar sind.

Die praktische Umsetzbarkeit der Optimierungen hängt zudem vom Systemtyp ab: In offenen Plattformen können Software, Peripherie und Datenverarbeitung gezielt angepasst werden, während kommerzielle, geschlossene Systeme häufig nur Parametrierung über Mess- und Sendeintervalle sowie aktivierbare Funktionen erlauben. Darüber hinaus können anwendungsfallabhängige Anforderungen Datenaggregation und seltene Übertragung begrenzen. Entsprechend sollten die vorgestellten Maßnahmen soweit möglich mit realitätsnahen Betriebsprofilen validiert werden.

8. Fazit und Ausblick

Die beiden Fallstudien legen nahe, dass in SEC Ketten mit vergleichsweise einfachen Maßnahmen signifikante Energie- und CO₂e-Einsparungen erreichbar sind. In der netzbetriebenen Labor-SEC-Kette konnten durch Reduktion der Edge-Grundlast und durch datenreduzierende Vorverarbeitung Einsparungen von fast 50 % in der Gesamtkette erzielt werden. Das Edge-Gerät erwies sich dabei als dominierender Verbraucher und damit als zentraler Hebel für betriebsbedingte Emissionen. Beim batteriebetriebenen Asset-Tracking-Modul dominiert hingegen die Herstellung den Fußabdruck, während in der Nutzungsphase vor allem die Gerätelebensdauer über die jährlichen Emissionen bestimmt. Hier zeigte sich die Kommunikationsstrategie als wirksamster Stellhebel: Weniger Übertragungen senken die jährliche CO₂e-Zuordnung deutlich, mit Einsparungen bis zu 95 %.

Über beide Anwendungsfälle hinweg lassen sich als praxisnahe Leitlinien ableiten: Hardware soll angemessen der Anwendung dimensioniert, Grundlast konsequent reduziert, Daten so früh wie möglich verarbeitet und Kommunikation minimiert werden. Diese Prinzipien sind breit übertragbar, müssen jedoch jeweils gegen Anforderungen an Latenz, Datenqualität und Systemrestriktionen abgewogen werden.

Zukünftige Arbeiten sollten den Cloud-Anteil systematisch einbeziehen um eine vollständige End-to-End-Bilanz zu ermöglichen. Darüber hinaus sind Feldmessungen unter realen Umwelt- und Funkbedingungen sinnvoll, um die Übertragbarkeit der Laborwerte zu validieren. Ergänzend bieten sich Untersuchungen zu Energy-Harvesting-Ansätzen sowie zu CO₂e-armen Hardwaredesigns an, um weitere Reduktionspotenziale in Herstellung und Betrieb zu untersuchen.

9. Danksagung

Dieses Whitepaper entstand im Rahmen des Verbundprojekts „Green ICT @ FMD – Kompetenzzentrum für ökologisch nachhaltige IKT“ (Förderkennzeichen 16ME0497). Wir danken dem Bundesministerium für Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung. Das Vorhaben wurde durch die Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) koordiniert. Unser besonderer Dank gilt vor allen dem Unternehmen Packwise für die konstruktive Zusammenarbeit und die Bereitstellung von Informationsmaterial, Systemdaten und Messobjekten sowie den Kollegen des Fraunhofer IIS und des Fraunhofer IZM für die Unterstützung bei der Ökobilanzierung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

10. Quellenverzeichnis

- [1] A. G. Frank, L. S. Dalenogare, und N. F. Ayala, „Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies“, *International Journal of Production Economics*, Bd. 210, S. 15–26, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.01.004.
- [2] L. Magadán, F. J. Suárez, J. C. Granda, und D. F. García, „Low-Cost Industrial IoT System for Wireless Monitoring of Electric Motors Condition“, *Mobile Netw Appl*, Bd. 28, Nr. 1, S. 97–106, Feb. 2023, doi: 10.1007/s11036-022-02017-2.
- [3] W. Z. Khan, M. H. Rehman, H. M. Zangoti, M. K. Afzal, N. Armi, und K. Salah, „Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges“, *Computers & Electrical Engineering*, Bd. 81, S. 106522, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.compeleceng.2019.106522.
- [4] T. Pirson und D. Bol, „Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 322, S. 128966, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128966.
- [5] F. K. Shaikh, S. Zeadally, und E. Exposito, „Enabling Technologies for Green Internet of Things“, *IEEE Systems Journal*, Bd. 11, Nr. 2, S. 983–994, Juni 2017, doi: 10.1109/JSYST.2015.2415194.
- [6] „DietPi“. [Online]. Verfügbar unter: <https://dietpi.com/>
- [7] Packwise, „Smart Cap & Plattform für smartes Tracking“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.packwise.de/de/solution>