

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

IoT-Stromsensor-Knoten zur Strommessung an Reinraum-Equipment für die Ermittlung und Optimierung des CO₂-Fußabdrucks an Halbleiterprozessanlagen

Ein Whitepaper von "HUB 1 – Sensor-Edge-Cloud-Systeme und HUB 3 - Ressourcen-optimierte Elektronikproduktion"

Franz Wenninger (Fraunhofer EMFT), Dr. Quoc Hung Nguyen (Fraunhofer EMFT), Christian Hochreiter (Fraunhofer EMFT), 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, Deutschland

Ansprechpersonen:

Franz Wenninger franz.wenninger@emft.fraunhofer.de (HUB 1 Sensor-Edge-Cloud)

Dr. Quoc Hung Nguyen quoc.hung.nguyen@emft.fraunhofer.de (HUB 3 Elektronik Produktion)

www.greenict.de

www.forschungsfabrik-mikroelektronik.de

Veröffentlicht:

03.11.2025

Einleitung

Im Rahmen des Kompetenzzentrums Green ICT @ FMD werden innovative Technologien zur ökologisch nachhaltigen Gestaltung von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) entwickelt. Ein zentrales Element ist die Entwicklung von Sensor-Edge-Cloud-Systemen (SEC).

Sensorknoten bilden eine zentrale Säule des Internets der Dinge (Internet of Things - IoT), indem sie Daten von Objekten, Anlagen und deren Umwelt über Sensoren erfassen, verarbeiten und übermitteln. Dieser Prozess erfolgt dezentral in der sogenannten Sensor-Edge-Cloud (SEC). Diese erhobenen Daten liefern wertvolle Informationen, die dazu dienen, Maschinen, Anlagen und Prozesse in unterschiedlichsten Bereichen zu monitoren und zu optimieren. Neben der Verbesserung von Sicherheit, Qualität, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit steht dabei häufig auch die Steigerung der Nachhaltigkeit im Fokus. Angesichts dieser Tatsache stellt sich jedoch die wichtige Frage nach der Nachhaltigkeit der Sensorknoten und deren Betrieb selbst.

In diesem Zusammenhang wird auf die Stromsensorknoten eingegangen, die für eine präzise Strommessung und Bilanzierung in energieintensiven Umgebungen, insbesondere in Reindräumen, von großer Bedeutung sind. Ziel ist es, die Messung an bestehenden Einzelanlagen zu ermöglichen, um eine exakte Erfassung des Stromverbrauchs dieser sicherzustellen.

Dazu wird in diesem Whitepaper der CO₂-Fußabdruck von vernetzten Stromsensorknoten für die Messung des Stroms an Reindraumanlagen in der Produktions- und Nutzungsphase analysiert. Der CO₂-Fußabdruck für beide Phasen des Stromsensorknotens soll möglichst klein sein, damit sich dieser bei einer Optimierung des Stromverbrauchs der Reindraumanlage schnell amortisiert.

Mit diesen Stromsensorknoten wird es erst möglich, den Strom an einzelnen Reindraumanlagen zu ermitteln, um damit den Energieeinsatz an diesen Anlagen zu berechnen. Der Energieeinsatz der Reindraumanlage stellt neben dem Energieverbrauch für Ressourcen und die Reindrauminfrastruktur einen wesentlichen Beitrag zur Berechnung des CO₂-Fußabdrucks des jeweiligen Prozessschrittes dar. Dies ist insbesondere im Hinblick auf den CO₂-Gesamtfußabdruck eines Reindraums, wie im Fall des Fraunhofer EMFT, von Bedeutung.

Die Fraunhofer-Gesellschaft hat sich als Klimaziel gesetzt, die Treibhausemissionen auf 55% bis 2030 zu reduzieren und bis 2045 weitgehend klimaneutral zu sein. Hierfür ist es notwendig, eine Ist-Analyse an den Fraunhofer-Instituten durchzuführen, um entsprechende Maßnahmen einleiten zu können. Gerade die Halbleiterreindräume an den Instituten müssen hierzu einer genauen Analyse unterzogen werden, da hier Gase mit einem hohen Global Warming Potential (GWP), wie z.B. SF₆, das einen 23.900-fachen höheren Fußabdruck als das Basisniveau von CO₂ besitzt, verwendet werden.

Es werden hier zwei Varianten des Stromsensors vorgestellt und deren CO₂-Fußabdrücke für die Produktions- und Nutzungsphase ermittelt. Die erste Variante des Stromsensor ist eine typische Shunt-Lösung, bei der in die Anlageninstallation ein Shunt zur Strommessung eingebaut werden muss. Die zweite Variante des Stromsensors hat einen Splitcore-Hall-Stromsensor, der sich perfekt eignet, um in Brown-Field-Installationen eingebaut zu werden.

Darüber hinaus wird aus den Erkenntnissen aus den beiden Untersuchungen ein Konzept für einen idealen Strom-Sensor für Brown-Field-Anwendungen erstellt.

1. Orientierende Umweltbilanzierung für die Stromsensorknoten

Eine orientierende Umweltbilanz oder orientierende Lebenszyklusanalyse (LCA – Life Cycle Assessment) ist eine grobe Analyse der Umweltwirkungen eines Produkts über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Es sollen damit erste Anhaltspunkte für die ökologischen Auswirkungen betrachtet werden, ohne dabei eine umfassende und detaillierte Lebenszyklusanalyse durchzuführen.

Ziele der orientierenden Umweltbilanz sind:

- Identifikation von Umweltaspekten wie Ressourcenverbrauch, Emissionen
- Erste Einschätzungen zur ökologischen Effizienz
- Unterstützung von Entscheidungsprozessen in der Produktentwicklung
- Es wird die Umweltbilanz für Produktionsphase und Nutzungsphase erstellt

In den folgenden Abschnitten werden daher für beide Varianten des Stromsensorknotens eine Bilanzierung der Produktionsphase und eine Abschätzung für die Nutzungsphase durchgeführt.

1.1 Stromsensorknoten mit externem Splitcore-Hall-Stromsensor

Für die Ermittlung des CO₂-Footprints (PCF – Product Carbon Footprint = CO₂-Fußabdruck) in der Produktionsphase des Stromsensorknotens mit externem Hall-Stromsensor wurden im Bottom-up-Ansatz die Bauteillisten (BOM – Bill of Material) der einzelnen Komponenten erfasst und eine Potenzialanalyse bzgl. des CO₂-Fußabdrucks mit Hilfe der Umweltdatenbank-Datenbank vom Fraunhofer IZM modelliert. Der Stromsensorknoten mit externem Hall-Sensor besteht aus insgesamt drei Komponenten, der Controllereinheit, hier dem Raspberry Pi, dem ADC-Shield zur Erfassung der Stromwerte mittels Wandlung der analogen Signale in digitale und dem externen Hall-Stromsensor, wie in Abbildung 1 ersichtlich.



Abbildung 1: Blockbild des Stromsensorknotens mit externem Hall-Stromsensor

In
ist der Raspberry Pi (links), das ADC-Shield (mitte) und der externe Hall-Stromsensor (rechts) zu sehen.

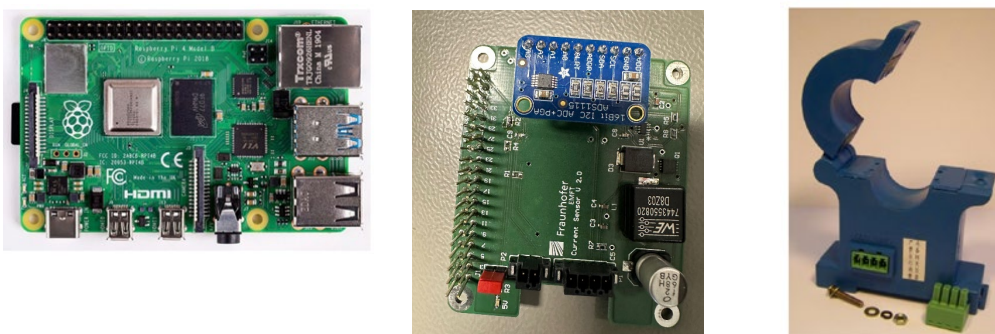


Abbildung 2: Stromsensorknoten bestehend aus RaspberryPi (links), ADC-Shield (mitte), externem Hall-Stromsensor (rechts)

Als nächstes werden den Bauteilen aus den Bauteillisten (BOM – Bill of Material) aller drei Komponenten des Stromsensorknotens mit externem Hall-Stromsensor ein CO₂-Fußabdruck zugeordnet. Dies geschieht entweder über Materialdatenbanken oder aus bereits existierenden Bilanzierungen. Falls nicht auf Datenbankwerte zurückgegriffen werden kann, kann anhand der Materialzusammensetzung ein CO₂-Fußabdruck abgeschätzt

werden. Diese Analyse wurde im Folgenden für alle drei Komponenten durchgeführt.

Der gesamte CO₂-Fußabdruck für das Stromsensordsystem mit externem Hall-Sensor teilt sich wie folgt auf:

1. Das GWP (Global Warming Potential) für den Raspberry Pi beträgt 9,46 kgCO₂ eq.

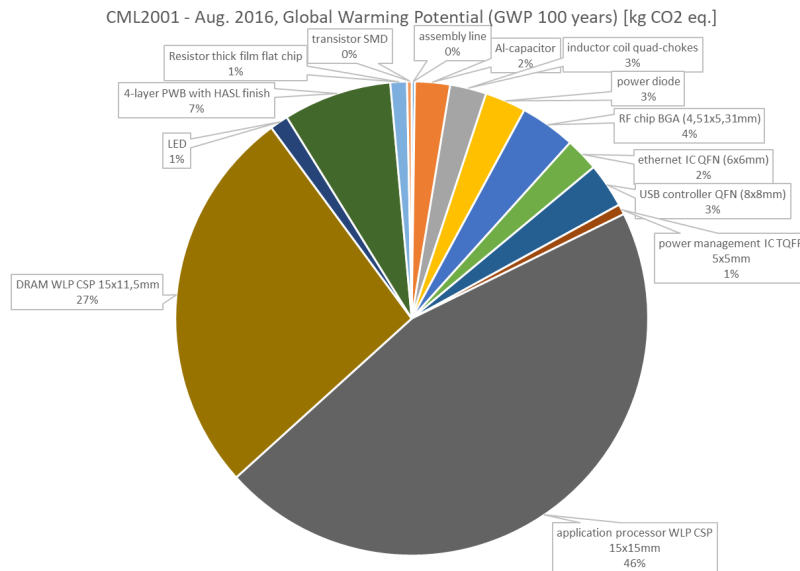


Abbildung 3: GWP für den Raspberry Pi

2. Das GWP (Global Warming Potential) für das ADC-Shield beträgt 0,64 kgCO₂ eq.

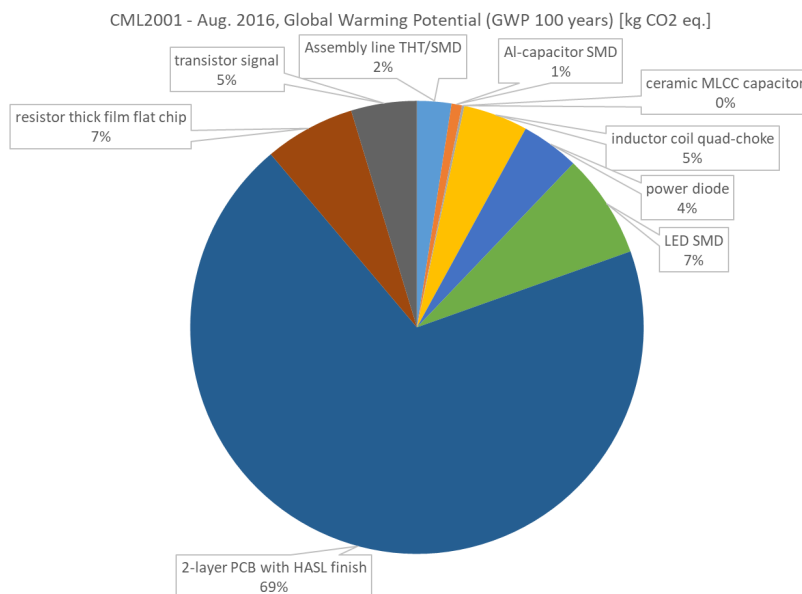


Abbildung 4: GWP des ADC-Shield

3. Das GWP (Global Warming Potential) für den externen Hall-Sensor beträgt ungefähr 1,57 kgCO₂ eq.

Daraus ergibt sich ein Gesamt-GWP von 11,668 kgCO₂ eq. für das Stromsensordsystem mit externem Hall-Stromsensor.

1.2 Stromsensorknoten mit integriertem Hall-Stromsensor

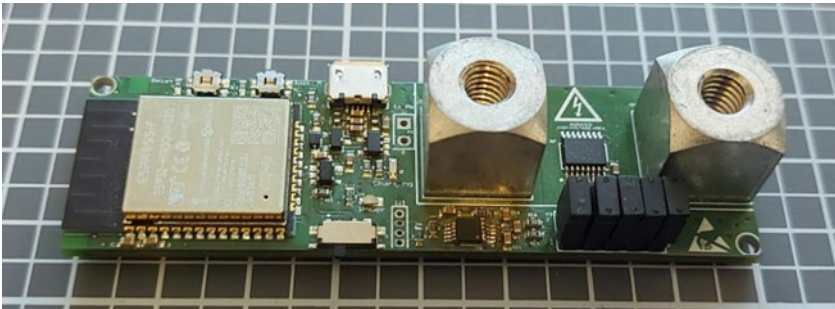


Abbildung 5: Stromsensorknoten mit integriertem Hall-Sensor

Für das Stromsensorknoten mit dem integrierten Hall-Sensor (s. Abbildung 5) konnte basierend auf der BOM (Bill of Material) ebenfalls der CO₂-Fußabdruck für die Produktionsphase ermittelt werden. Das Fraunhofer IZM hat über die Umweltdatenbank einen GWP von **0,45 kgCO₂ eq.** ermittelt. Einige Unschärfen im GWP stellen die Kommunikationsmodule dar, da nicht eindeutig klar ist, wie viele ICs in den Modulen verbaut wurden und damit keine eindeutige Chipfläche abgeschätzt werden konnte.

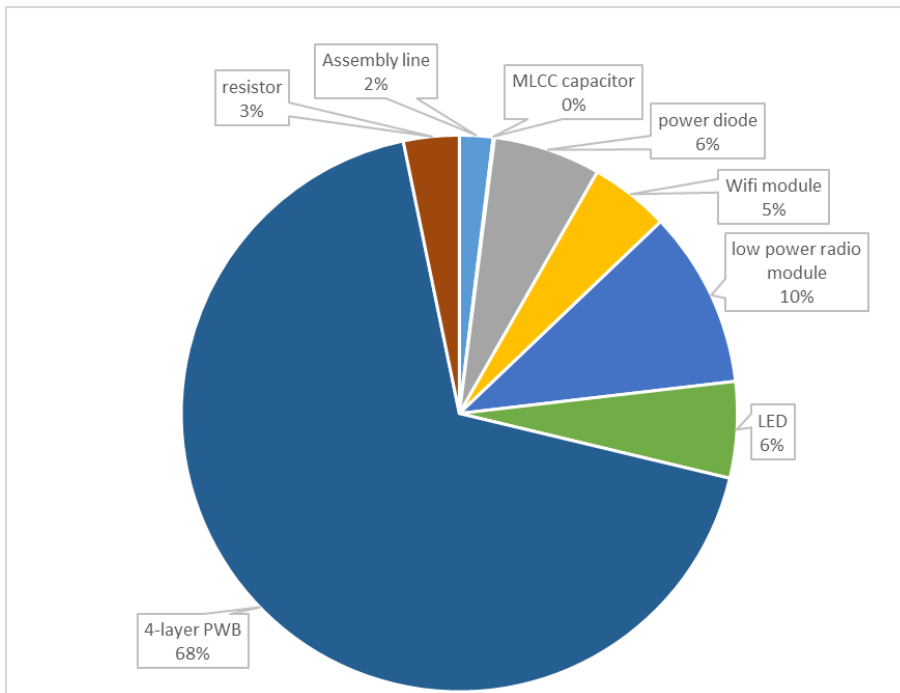


Abbildung 6: GWP des Stromsensorknotens mit integriertem Hall-Sensor

Die Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks in der Nutzungsphase wurde ebenfalls für beide Stromsensorknoten ermittelt. Bei dem Anwendungsfall zur Erfassung der Nutzungsdaten von Reinraumanlagen und -equipment, muss ein 24/7-Betrieb angenommen werden, da solche Anlagen nie ausgeschaltet, höchstens in einen Standby-Betrieb versetzt werden. Daher muss der Anlagenstrom permanent überwacht werden. Für das Stromsensorknoten mit externem Hall-Sensor ergibt sich damit für die Nutzungsphase folgende Berechnung:

	Spannung	Strom	Leistung P [W]	Energie E [Wh]	Energie E [kWh]
Stromsensor	5	0,7	3,5		
im Sendebetrieb					
			gesamte Leistung	Energie pro Tag	Energie pro Jahr
			3,5	84	30,66
	Gesamt Energie [kWh] pro Jahr		Anteil	Anteil Energie [kWh] pro Jahr	
Stromsensor	30,66			1	30,66
im Sendebetrieb					
			Gesamt Energie [kWh] pro Jahr		30,66
			Umrechnung in kg CO ₂ eq. (f. 2022, UBA)		
			0,434 kg CO ₂ eq./kWh		
				13,3064	kg CO₂ eq./a

Abbildung 7: Berechnung des CO₂-Fußabdruck in der Nutzungsphase für das Sensorsystem mit dem externen Hall-Sensor

Bei einer angenommenen Lebensdauer des Sensorsystems von 10 Jahren erhält man einen Wert für die Nutzungsphase von 133,06 kgCO₂ eq.

Für das Stromsensordsystem mit integriertem Hall-Sensor ergibt sich für die Nutzungsphase folgende Berechnung:

	Spannung	Strom	Leistung P [W]	Energie E [Wh]	Energie E [kWh]
Stromsensor	5	0,07	0,35		
im Messbetrieb					
			gesamte Leistung	Energie pro Tag	Energie pro Jahr
			0,35	8,4	3,066
	Spannung	Strom	Leistung P [W]	Energie E [Wh]	Energie E [kWh]
Stromsensor	5	0,1	0,5		
im Sendebetrieb					
			gesamte Leistung	Energie pro Tag	Energie pro Jahr
			0,5	12	4,38
	Gesamt Energie [kWh] pro Jahr		Anteil	Anteil Energie [kWh] pro Jahr	
Stromsensor	3,066			0,99	3,03534
im Messbetrieb					
Stromsensor	4,38			0,01	0,0438
im Sendebetrieb					
			Gesamt Energie [kWh] pro Jahr		3,07914
			Umrechnung in kg CO ₂ eq. (f. 2022, UBA)		
			0,434 kg CO ₂ eq./kWh		
				1,33635	kg CO₂ eq./a

Abbildung 8: GWP in der Nutzungsphase des Stromsensordsystem mit integriertem Hall-Sensor

Für die Lebensdauer des Sensorsystems von 10 Jahren kann ein CO₂-Fußabdruck von 13,36 kgCO₂ eq. angegeben werden.

Zum Vergleich des Gesamt-GWPs der beiden Stromsensordsysteme kann Folgendes festgehalten werden:

1. Produktions- und Nutzungsphase für das Stromsensordsystem mit externem Hall-Sensor:

$$11,668 \text{ kg CO}_2 \text{ eq.} + 133,064 \text{ kg CO}_2 \text{ eq.} = \underline{144,732 \text{ kg CO}_2 \text{ eq.}}$$

2. Produktions- und Nutzungsphase für das Stromsensordsystem mit integriertem Hall-Sensor:

$$0,45 \text{ kg CO}_2 \text{ eq.} + 13,364 \text{ kg CO}_2 \text{ eq.} = \underline{13,81 \text{ kg CO}_2 \text{ eq.}}$$

Fazit:

Die durchgeführte Umweltbilanzierung der beiden Stromsensordesigns zeigt, dass der Gesamt-GWP des Stromsensordesigns mit dem integrierten Hall-Sensor um ca. den **Faktor 10 kleiner** als der Gesamt-GWP des Stromsensordesigns mit dem externen Hall-Sensor ist.

1.3 Optimierter Stromsensorknoten mit externem Splitcore-Hall-Stromsensor

Zur weiteren Reduktion des CO₂-Fußabdrucks von einem Stromsensorknoten wurde ein Konzept entwickelt, das die vollständige Integration der Elektronik mittels eines ausgewählten Mikrocontrollers mit allen erforderlichen Schnittstellen ermöglicht. Die Versorgung des Sensorsystems könnte auch durch einen Energy-Harvester, z.B. von einem Partnerinstitut, erfolgen. Der Stromsensor muss nicht zwingend auf der Platine integriert sein; vielmehr erleichtert ein Hallsensor mit Splitferrit zur Strommessung die nachträgliche Installation erheblich. Zudem hat dieser Sensor über eine längere Nutzungsdauer lediglich einen geringfügig höheren Einfluss auf den CO₂-Fußabdruck.

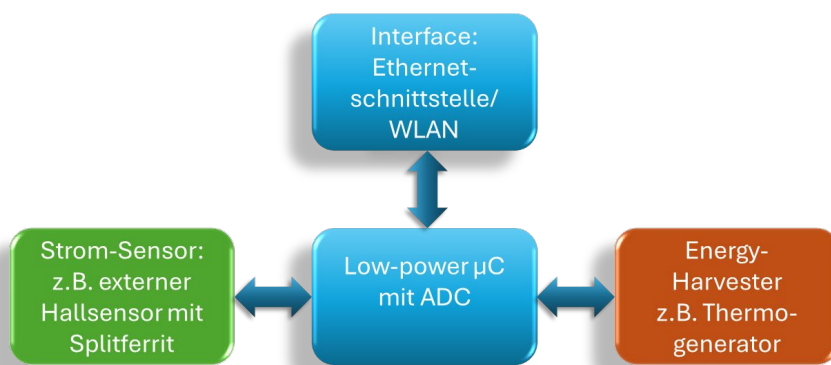
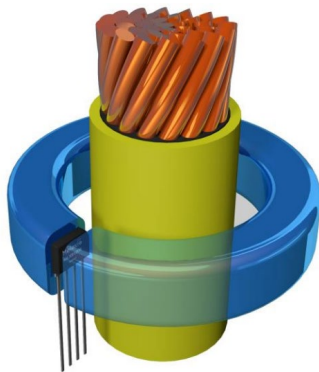


Abbildung 9. Konzept eines optimierten Stromsensors mit externem Hallsensor mit Splitferrit

1.4 Unterschiedliche Hall-Sensor-Installationen für die Strommessung an Prozessanlagen

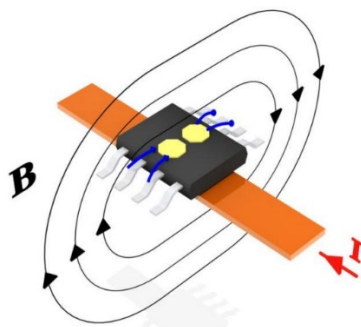
Konventioneller Hall-Sensor



$$B = 1,25 * \frac{I}{d}$$

d = Größe Luftspalt im Ferrit

planarer Hall-Sensor



$$B = 1,25 * \frac{I}{W}$$

W = Breite des Leiters

planarer Hall-Sensor mit Rundkabel

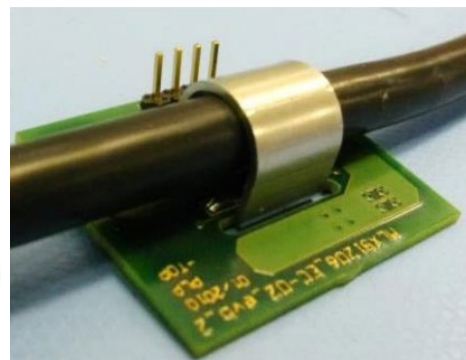


Abbildung 10. Konventionelle (links) und planare Hall-Sensoren (rechts) [1]

Der konventionelle Hall (s. Abbildung 10 links) ist auch in der Ausführung als Splitcore-Hallsensor zur Strommessung erhältlich, um den Stromsensor an bestehenden Installationen zu installieren. Auch der planare Aufbau des Hall-Sensors kann zur Strommessung an Rundkabeln genutzt werden. Dafür ist zusätzlich ein Abschirmblech aus Mu-Metall (s. Abbildung 10 rechts) notwendig. Neben Hall-Sensor basierte Stromsensoren, gibt es auch auf Spulen basierte Stromsensoren, ebenfalls mit einem Splitcore-Ferrit. Allerdings muss hier eine aufwendige Kalibrierung erfolgen, bis eine lineare Abhängigkeit zwischen Strom und Messwert entsteht.

Beide Hall-Sensortypen, konventionell und planar, zeigen einen sehr guten linearen Zusammenhang zwischen Ausgangsspannung und Stromstärke im elektrischen Leiter (s. Abbildung 11).

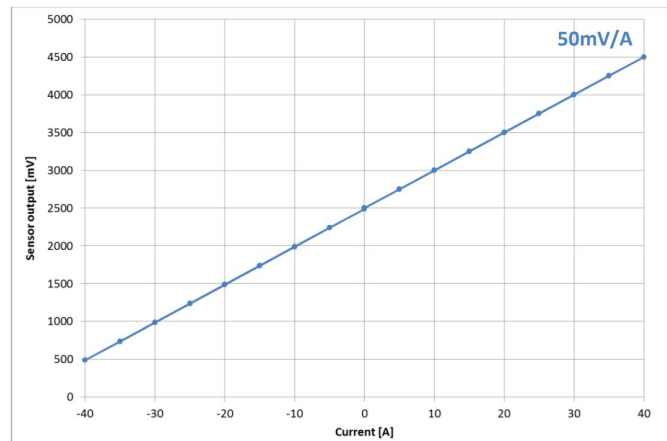
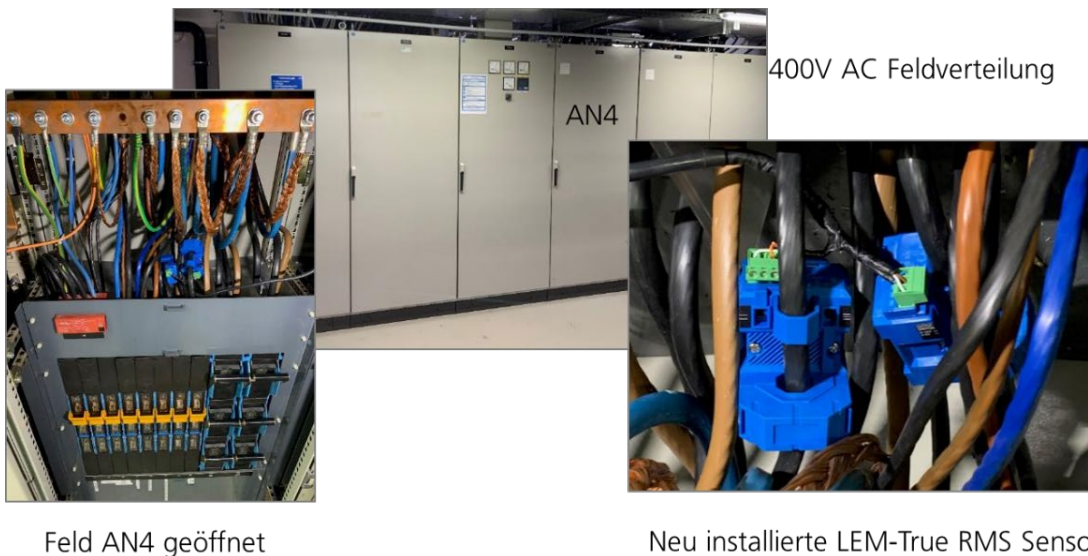


Abbildung 11. Zusammenhang zwischen der Ausgangsspannung und der Stromstärke im elektrischen Leiter [1]

2. Einsatz von Sensoren zur Überwachung des Stromverbrauchs von Produktionsanlagen im Reinraum

Ausgewählte Stromsensoren wurden erfolgreich an den Prozessanlagen im Reinraum der EMFT installiert. Das EMFT-Institut hat die Stromsensoren evaluiert, indem sie zur Überwachung des Evatec Clusterline-Sputter-Tools und des Tempress-Diffusionsofens eingesetzt wurden. Dabei wird der Stromverbrauch erfasst und in unserer InfluxDB Zeitreihen-Datenbank gespeichert. Ziel ist es, einige Standardprozesse zu analysieren, um mögliche Energieeinsparpotenziale zu identifizieren.



Feld AN4 geöffnet

Neu installierte LEM-True RMS Sensoren

Abbildung 12: Stromsensoren-Installation an den Prozessanlagen am EMFT

2.1 Evatec Clusterline Sputter System

An dem Evatec Clusterline Sputter System wurde der Stromverbrauch bei einem Standard-Sputterprozess von 377 Ohm-TiN (30 nm) auf den Wafern unseres Kunden überwacht. Die Stromdaten sind in Abbildung 13 dargestellt und erläutern die folgenden Phasen des Sputterprozesses:

- (1) Substrathalter heizen von 50°C auf 340°C
- (2) Konditionierungsprozess
- (3) Pause
- (4) Wafer Sputtern (28 Wafer)
- (5) Magnetron ausschalten
- (6) Heizung herabsetzen auf 50°C

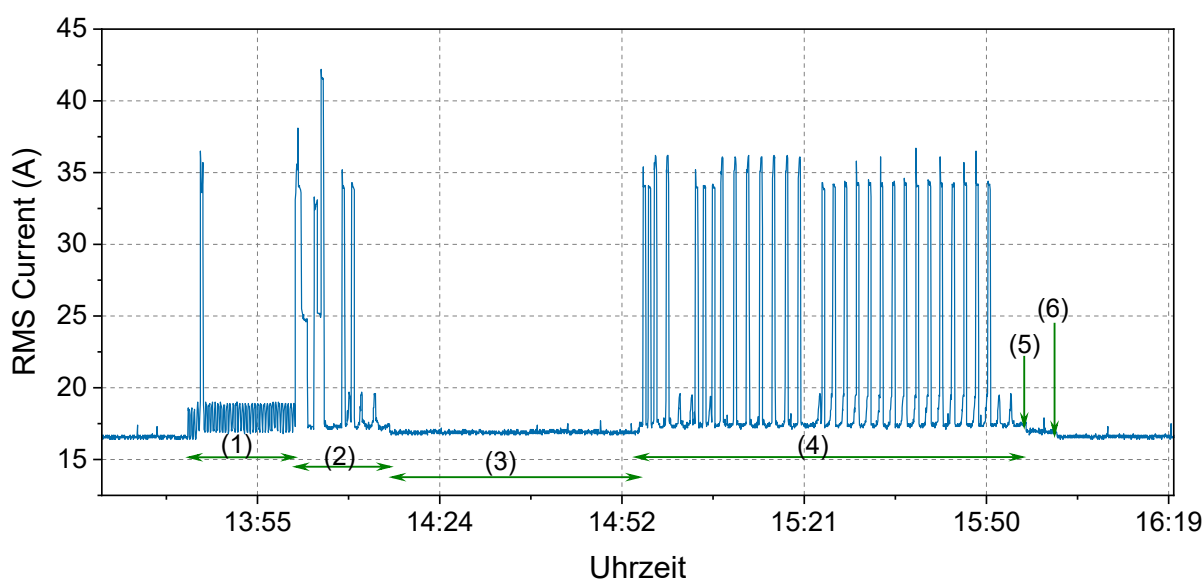


Abbildung 13: Messungen der Stromaufnahme von dem Evatec Clusterline während des Sputterns von 377 Ohm-TiN auf 200-mm-Wafern

Um den Energieverbrauch der einzelnen Komponenten des Systems zu untersuchen, wurde die gesamte Maschine komplett abgeschaltet und jede Komponente wieder eingeschaltet (s. Abbildung 15). Die Komponenten der Sputtering-Anlage, die zum Energieverbrauch beitragen, sind die kryogenen Pumpen, die Turbopumpen und die Kompressoren. Der Leistungsanteil der kryogenen Pumpen ist relativ gering (0,5-0,8 kW), da wir die Pumpen vor einigen Jahren durch energieeffiziente Pumpen ersetzt haben. Der Energieverbrauch der Kompressoren ist hoch (ca. 8,3 kW), aber diese müssen die ganze Zeit eingeschaltet sein.

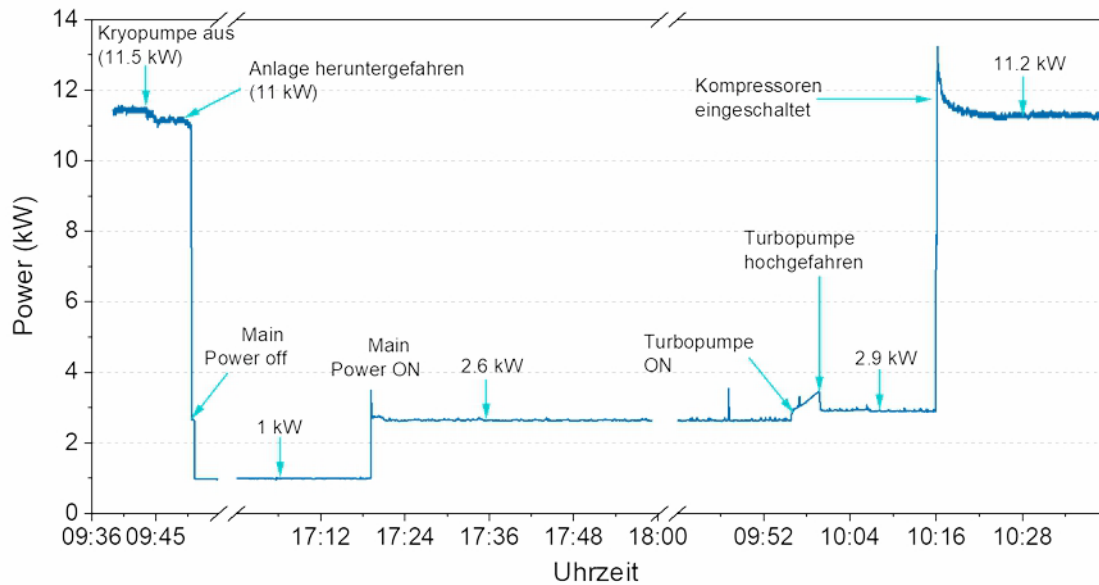


Abbildung 14: Energieverbrauch der einzelnen Komponenten des Sputtering-Systems

Aus Sicht des Prozesses kann man den Energieverbrauch optimieren, indem man die Temperatur des Waferchucks während des Sputterprozesses reduziert. Daher wurde der Sputterprozess von TiN im Detail auf mögliche Energieeinsparungen untersucht, indem die Chuck-Temperatur von 340°C auf Raum-Temperatur reduziert wurde. Der Energieverbrauch wurde für eine Charge von 25 Wafern berechnet. Mit diesem Wert beträgt die Energieeinsparung nur etwa 0,6 Prozent der Energie, die das gesamte System für den Sputterprozess verbraucht. Also für 25 Wafer können wir nur 0,17 kWh sparen. Weitere Möglichkeiten zur Energieeinsparung werden evaluiert.

2.2 Diffusionsofen

Der Tempress-Diffusionsofen wurde auch mit einem unserer Standardverfahren getestet, bei dem 530nm feuchtes Oxid auf Si-Wafern abgeschieden wurde. Die Standby-Temperatur des Ofens lag bei 650°C und die Abscheidungstemperatur bei 1000°C. Abbildung 15 zeigt die Aufzeichnung des gesamten Prozesses, die sich durch die folgenden Phasen erklären lässt:

- (1) Öffnen des Ofens und Laden der Wafer
- (2) Ofen wurde geschlossen und die Temperatur auf 1000°C hochgefahren
- (3) Oxidation
- (4) Abkühlung des Ofens auf die Standby-Temperatur (650°C)
- (5) Entladen des Wafers

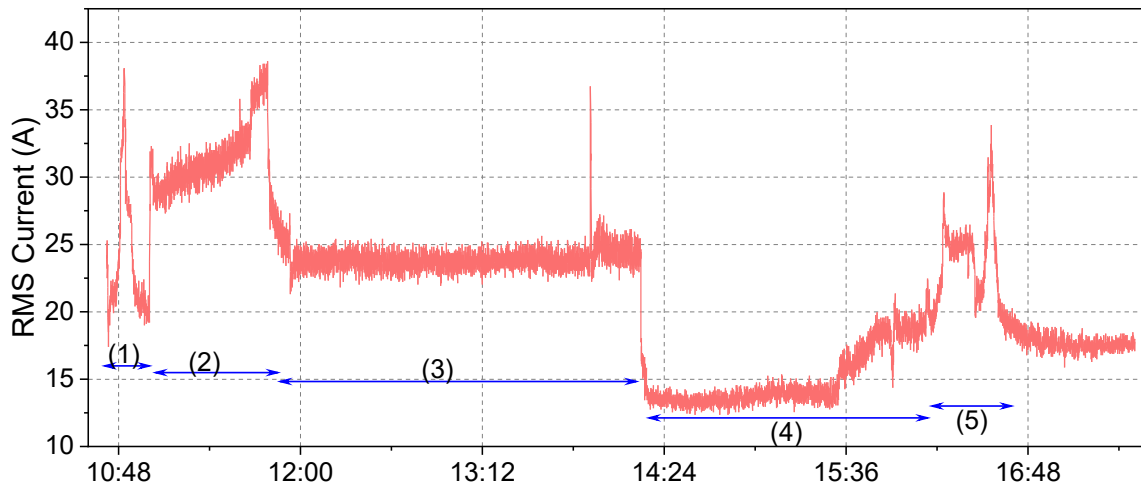


Abbildung 15: Messungen der Stromaufnahme von dem Diffusion Ofen für eine Deposition von 530nm Oxide auf Si Wafern

Wir haben zwei Strategien zur Energieeinsparung an unserem thermischen Ofen am Fraunhofer EMFT erprobt. Die erste ist die Senkung der Standby-Temperatur während des Wochenendes von 750°C auf 450°C (Abbildung 17). Mit dieser Maßnahme berechnen wir eine Energieeinsparung von 8,2tCO₂ eq./Jahr. Allerdings dauert bei diesem Ansatz das Aufheizen (von 450°C zurück auf 750°C) ein paar Stunden. Aus diesem Grund ist dieses Vorgehen nicht sehr sinnvoll, da das Erreichen des Betriebsmodus für neue Ofenfahrten zu lange dauert. Außerdem muss man die Temperatur jeden Freitag und Montag bisher manuell einstellen.

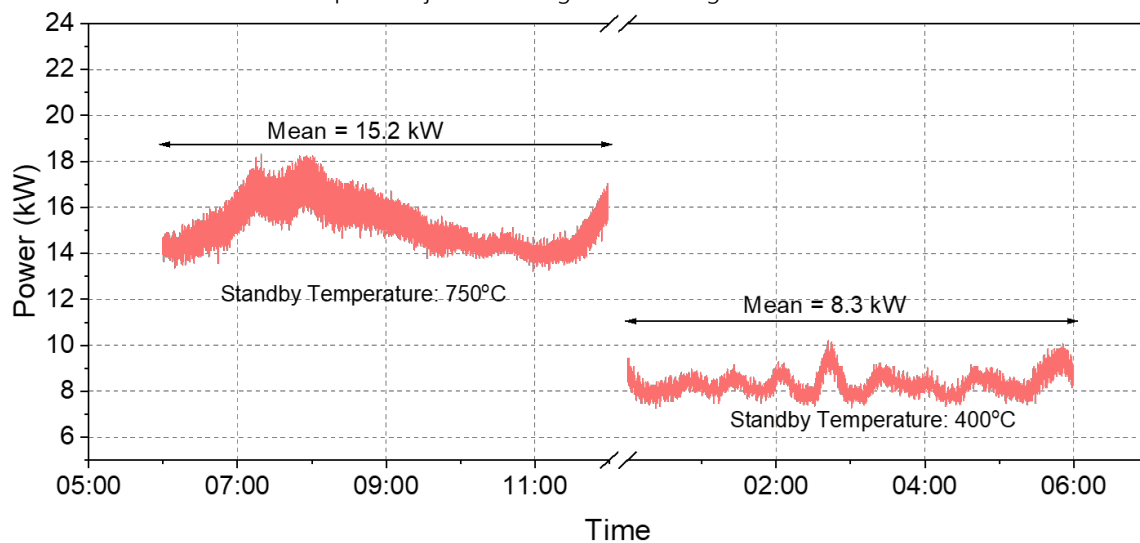


Abbildung 16: Energieverbrauch des thermischen Ofens durch die Absenkung der Standby-Temperatur von 750°C auf 450°C über das Wochenende.

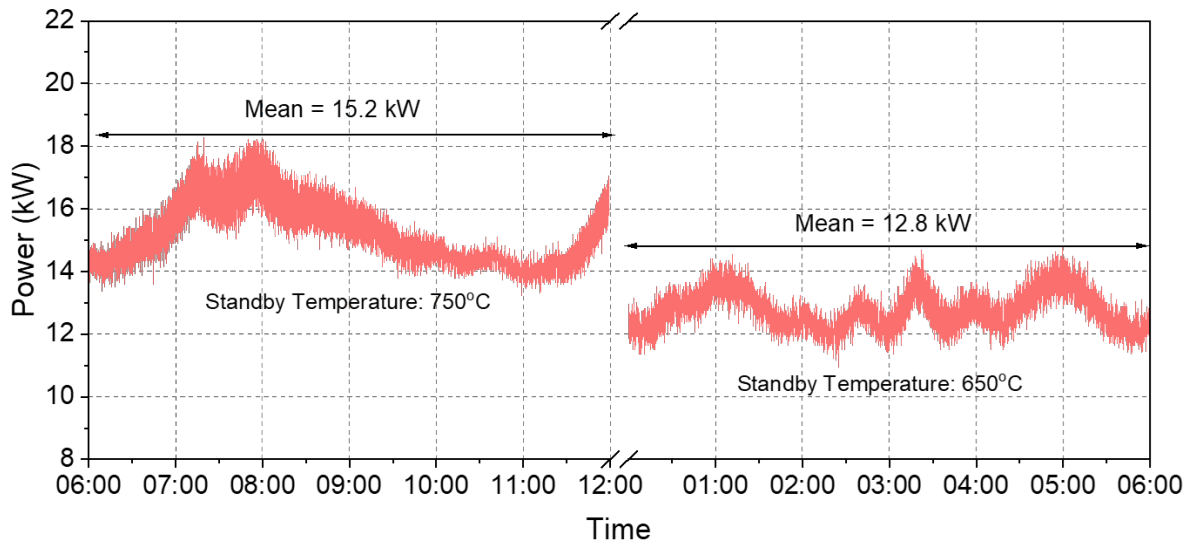


Abbildung 17: Energieverbrauch des thermischen Ofens durch Senkung der Standby-Betriebstemperatur von 750°C auf 650°C während der Wochentage

Der zweite Ansatz ist die Reduzierung der Standby-Temperatur im Betrieb von 750°C auf 650°C (s. Abbildung 17). Dies ergibt eine Einsparung von 5,1 tCO₂ eq./Jahr. Dies ist günstiger als der erste Ansatz, da hier lediglich auf die neue Standardbetriebstemperatur umgestellt wird. Die Berechnung erfolgt auf der Grundlage von Strommix Deutschland 2024 (363 g in CO₂ eq. pro Kilowattstunde).

3. Zusammenfassung

Hintergrund und Zielsetzung

In diesem Whitepaper wird die Arbeit des Kompetenzzentrums „Green ICT @ FMD“ beschrieben, das innovative Technologien für eine ökologisch nachhaltige Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) entwickelt. Ein Schwerpunkt liegt hierbei auf der Entwicklung und Bewertung von Stromsensorknoten zur präzisen Strommessung in Reinraum-Produktionsanlagen, um den CO₂-Fußabdruck von Halbleiterprozessen und -komponenten zu ermitteln und zu optimieren und zu reduzieren.

Nachhaltigkeit der Sensorknoten

Sensorknoten sind zentrale Elemente des IoT und liefern Daten zur Optimierung von Maschinen, Anlagen und Prozessen – mit Fokus auf Nachhaltigkeit. Die Frage nach der ökologischen Bilanz der Sensorknoten selbst und deren CO₂-Fußabdruck im Betrieb sind wesentliche Punkte, die zu Beginn einer geplanten Optimierung abgeschätzt werden müssen, da das Einsparpotenzial höher sein muss als das GWP für die Sensorknoten selbst.

Varianten der Stromsensorknoten

Es werden zwei Varianten verglichen, nämlich Stromsensorknoten mit externem Splitcore-Hall-Stromsensor und Stromsensorknoten mit integriertem Hall-Stromsensor.

Stromsensorknoten mit externem Splitcore-Hall-Stromsensor

Komponenten: Raspberry Pi, ADC-Shield, externer Hall-Sensor.

Gesamt-GWP (Global Warming Potential) in der Produktionsphase: 11,668 kg CO₂ eq..

GWP in der Nutzungsphase (10 Jahre): 133,06 kg CO₂ eq..

Gesamt: 144,73 kg CO₂ eq..

Stromsensorknoten mit integriertem Hall-Stromsensor

Gesamt-GWP in der Produktionsphase: 0,45 kg CO₂ eq.

GWP in der Nutzungsphase (10 Jahre): 13,36 kg CO₂ eq..

Gesamt: 13,81 kg CO₂ eq.

Erkenntnis:

Das System mit integriertem Hall-Sensor verursacht über den Lebenszyklus hinweg nur etwa ein Zehntel des CO₂-Fußabdrucks im Vergleich zur externen Lösung.

Optimierungskonzept

Ein optimiertes Konzept sieht die vollständige Integration der Elektronik mit Mikrocontroller und Energy-Harvesting vor.

Splitcore-Hallsensoren erleichtern die Nachrüstung und haben nur einen geringen Einfluss auf den CO₂-Fußabdruck über die Lebensdauer.

Praxiseinsatz und Energieeinsparung

Die Sensoren wurden erfolgreich an Fertigungsanlagen im Reinraum der EMFT installiert (z.B. Evatec Clusterline Sputtern System, Tempres Diffusionsofen).

Die Messungen ermöglichen die Identifikation von Energieeinsparpotenzialen, z.B. durch Anpassung der Standby-Temperaturen.

Beispiel: Senkung der Standby-Temperatur eines Diffusionsofens von 750°C auf 650°C spart 5,1 t CO₂ eq. pro Jahr.

Gesamtfazit

Die Umweltbilanzierung zeigt, dass die Wahl des Sensordesigns einen erheblichen Einfluss auf den ökologischen Fußabdruck hat.

Durch gezielte technische Maßnahmen und Monitoring lassen sich signifikante Energie- und CO₂-Einsparungen in der Halbleiterproduktion erzielen.

Quellenverzeichnis

- [1] Current-Sensors-Design-Guide-Application-Note-Melexis.pdf (2016), Melexis, REV012, August 2016
- [2] Fraidling, F., Hochreiter, C., Heinrich, F., Rieger, F., & Wenninger, F. (2023). Tiny Machine Learning Sensor Platform for Local Sensor Data Fusion and Evaluation. MikroSystemTechnik Kongress 2023 - Mikroelektronik, Mikrosystemtechnik Und Ihre Anwendungen - Nachhaltigkeit Und Technologiesouveranitat, Proceedings, 714–721.
- [3] Ajbl, A., Pastre, M., & Kayal, M. (2013). A Fully Integrated Hall Sensor Microsystem for Contactless Current Measurement. *IEEE Sensors Journal*, 13(6), 2271–2278.
- [4] Crescentini, M., Syeda, S. F., & Gibiino, G. P. (2022). Hall-Effect Current Sensors: Principles of Operation and Implementation Techniques. *IEEE Sensors Journal*, 22(11), 10137–10151.
- [5] A. Datta, K. Raj and R. Sarker, "Implementation of a high accuracy ac current sensing scheme using hall-sensor," 2019 International Conference on Energy Management for Green Environment (UEMGREEN), Kolkata, India, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/UEMGREEN46813.2019.9221592. keywords: {Temperature sensors;Performance evaluation;Economics;Accuracy;Microcontrollers;Green products;Voltage;Reproducibility of results;Sensors;Energy management;AC current sensing;hall-sensor;ATmega microcontroller;high accuracy},