

HOCHSCHULE FÜR TECHNIK UND WIRTSCHAFT BERLIN
MASTERSTUDIENGANG ANGEWANDTE INFORMATIK



**Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin**

University of Applied Sciences

Low Energy Solarharvester

Henning, Tobias
HTW Berlin
s0578256@htw-berlin.de

Februar, 2026

Abstract

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung, Umsetzung und Validierung eines energieeffizienten Hardwareprototyps zur digitalen Darstellung von Raumbelegungsplänen an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW). Ausgangspunkt ist die Problematik, dass die bisherigen Papieraushänge nur zu Semesterbeginn aktualisiert werden und keine Möglichkeit zur Echtzeitaktualisierung bieten. Ziel der Arbeit ist es, durch den Einsatz von E-Ink-Displays und die Auswahl optimierter Hardwarekomponenten eine signifikante Verlängerung der Betriebsdauer im Vergleich zu bisherigen Prototypen zu erreichen und den Wartungsaufwand zu minimieren.

Im Rahmen einer umfassenden Analyse wurden bestehende Projekte an der HTW untersucht, deren Hardware- und Softwarearchitekturen verglichen und deren Laufzeiten bewertet. Darauf aufbauend erfolgte die Konzeption eines neuen Prototyps, bei dem insbesondere auf einen niedrigen Energieverbrauch im Deep-Sleep-Modus Wert gelegt wurde. Für die Umsetzung wurde ein Firebeetle 2 ESP32 Mikrocontroller ausgewählt, der durch seine hohe Energieeffizienz überzeugt. Ergänzend wurde ein Gehäuse entwickelt, das sich nahtlos in die bestehende Wandhalterung für Raumbelegungspläne der HTW einfügt und die Hardwarekomponenten zuverlässig schützt.

Die Implementierung umfasste sowohl die Anpassung der Software an die neue Hardware als auch die Fertigung des Gehäuses mittels Lasercutter. Die Validierung des Prototyps erfolgte durch Messungen der Leistungsaufnahme und Funktionstests im realen Umfeld. Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem entwickelten Ansatz eine theoretische Laufzeit von etwa einem Jahr erreicht werden kann, wodurch die Anforderungen an eine energieeffiziente und wartungsarme Lösung erfüllt werden. Abschließend werden Optimierungspotenziale sowie Perspektiven für die Weiterentwicklung, wie etwa die Integration von Photovoltaikzellen, diskutiert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Motivation	1
1.3	Zielsetzung	1
1.4	Methodik	1
2	Analyse und Recherche	2
2.1	Laufzeitmessung des Raumbellegungsplans	2
2.2	Recherche zu Photovoltaikzellen für Innenlichtbedingungen	3
2.3	Recherche zu Ladereglern für Photovoltaikzellen	4
3	Erläuterung zur Nutzung von KI	5
	Literaturverzeichnis	6

Abbildungsverzeichnis

1	Batteriespannung über die Zeit	2
2	PowerFilm LL200-3.6-75 Photovoltaikzelle	3

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

OTA Over-the-Air

ADC Analog-Digital-Converter

LSF Lehre Studium Forschung

API Application Programming Interface

V_{REF} Referenzspannung

1 Einführung

1.1 Einleitung

Im Hinblick auf die zunehmenden Anforderungen an Energieeffizienz und nachhaltige Systemkonzepte, gewinnt der Entwicklungsbedarf energieautarker elektronischer Systeme zunehmend an Bedeutung. Besonders im Bereich batteriegetriebener IoT-Anwendungen, stellt die begrenzte Lebensdauer von Energiespeichern eine zentrale Herausforderung dar. Wartungskosten, Batteriewechsel und ökologische Aspekte sprechen für alternative oder ergänzende Energieversorgungskonzepte. Eine vielversprechende Möglichkeit stellt die Nutzung photovoltaischer Energiegewinnung unter Indoor-Lichtbedingungen dar. Moderne Dünnschicht-Solarzellen ermöglichen selbst bei vergleichsweise geringer Beleuchtungsstärke eine nutzbare Leistungsabgabe. Ob und in welchem Umfang diese Energie ausreicht, um ein energieoptimiertes System dauerhaft oder teilweise autark zu betreiben, ist jedoch stark anwendungsabhängig und erfordert eine systematische Untersuchung.

1.2 Motivation

Im ersten Projektsemester wurde ein erster Prototyp eines digitalen Raumbelungsplans entwickelt, der auf einem E-Ink-Display basiert. Der Fokus lag dabei auf der Entwicklung eines energieeffizienten Systems, das eine lange Laufzeit ermöglicht. In einer ersten theoretischen Analyse konnte für einen 1000 mAh 3,7 V Akku eine Laufzeit von etwa einem Jahr prognostiziert werden, was eine signifikante Verbesserung gegenüber bisherigen Prototypen darstellt. Der daraus resultierende Energiebedarf lag bei etwa 70,66 mWh pro Woche, was einer mittleren Leistungsaufnahme von etwa 0,42 mWh pro Stunde entspricht. Eine erste Langzeitmessung über den Zeitraum vom 23.10.2025 bis zum 13.02.2026 liegt vor. Eine vorläufige Sichtung der Daten deutet darauf hin, dass die Laufzeit länger sein könnte als in der theoretischen Prognose erwartet. Aufgrund dieses vielversprechenden Ergebnisses soll eine mögliche Integration von Photovoltaikzellen zur weiteren Verlängerung der Laufzeit untersucht werden.

1.3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines energieautarken Versorgungskonzepts mittels Photovoltaikzellen für den im ersten Projektsemester entwickelten Raumbelungsplan und andere IoT-Anwendungen, die unter ähnlichen Bedingungen betrieben werden. Dabei liegt der Fokus auf einer maximalen Energieeffizienz, um die Laufzeit des Systems zu verlängern und den Wartungsaufwand zu minimieren. Das System soll dabei so konzipiert werden, dass es unabhängig vom Raumbelungsplan betrieben werden kann, um eine flexible Integration in verschiedene Anwendungsbereiche zu ermöglichen. Im Anschluss soll geprüft werden, in welchem Umfang die Photovoltaikmodule unter normalen Innenlichtbedingungen Energie liefern und ob diese den Verbrauch des Systems langfristig decken oder die Batterielaufzeit messbar verlängern können.

1.4 Methodik

Zu Beginn soll eine umfassende Analyse der Energieverbrauchsmessungen des bisherigen Prototyps durchgeführt werden, um den tatsächlichen Energiebedarf zu ermitteln. Anschließend erfolgt eine Recherche zu geeigneten Photovoltaikzellen, die unter schlechten Lichtbedingungen eine möglichst hohe Energiegewinnung ermöglichen. Ist eine geeignete Zelle gefunden, muss ein dazu passender Laderegler ausgewählt werden. Dieser soll die Energie der Photovoltaikzelle effizient in den Akku einspeisen und gleichzeitig eine Überladung verhindern. Nachdem ein passendes System von Photovoltaikzelle und Laderegler ausgewählt wurde, muss eine kontinuierliche Messung der Stromgewinnung zwischen Laderegler und Akku umgesetzt werden, um die Effektivität der Energiegewinnung zu bewerten. Dazu muss ein geeigneter Strommonitoring-Chip ausgewählt und in die bestehende Hardware integriert werden. Abschließend soll eine Schnittstelle umgesetzt werden, die es ermöglicht, die gewonnenen Daten zur Energiegewinnung und zum Energieverbrauch zu überwachen und auszuwerten.

2 Analyse und Recherche

2.1 Laufzeitmessung des Raumbelungsplans

Eine Laufzeitmessung des Raumbelungsplans wurde über den Zeitraum vom 23.10.2025 bis zum 13.02.2026 durchgeführt. Die Messung erfolgte über eine in Node-Red implementierte Schnittstelle, die für jede Aktualisierungsanfrage des Raumbelungsplans die aktuelle Uhrzeit und die derzeitige Batteriespannung in eine Textdatei schreibt. Innerhalb dem Messzeitraum von 114 Tagen wurden 416 Aktualisierungsanfragen durchgeführt. In dieser Zeit ist die Batteriespannung von 4,05 V auf 3,96 V gesunken (Abbildung 1).

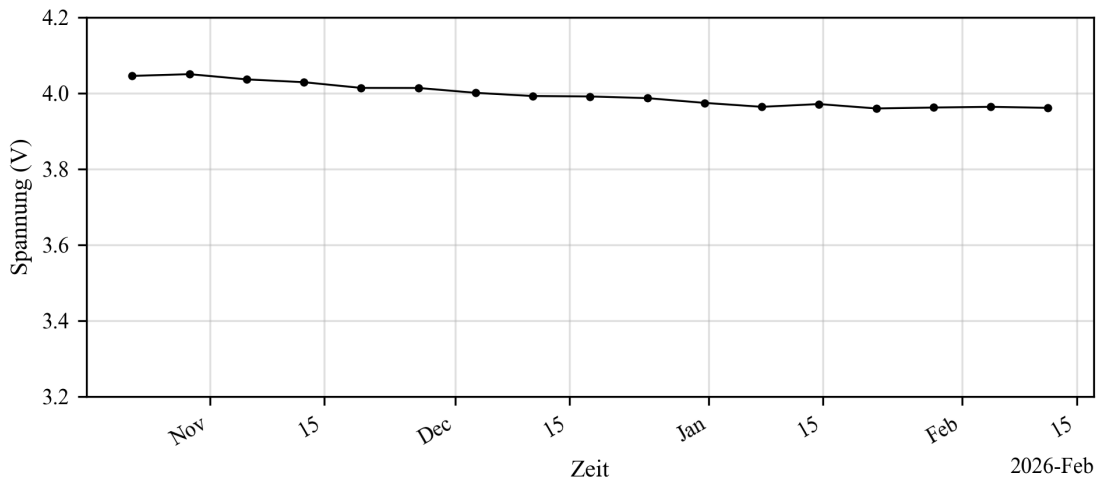


Abbildung 1: Batteriespannung über die Zeit

Über folgende Formel kann der anteilige Kapazitätsverlust ΔQ approximiert werden, wobei U_{\max} der maximalen Spannung, U_{\min} der minimalen Spannung, U_{start} der Startspannung und U_{end} der Endspannung entspricht:

$$\Delta Q = \frac{U_{\text{start}} - U_{\text{end}}}{U_{\max} - U_{\min}} = \frac{4.05 - 3.96}{4.2 - 3.2} = \frac{0.09}{1.0} = 0.09$$

Dies entspricht einem Kapazitätsverlust von etwa 9% über den Zeitraum von 114 Tagen. Dadurch könnte die hochgerechnete Laufzeit des Systems bei etwa 1266 Tagen liegen, was etwa 3,5 Jahren entspricht. Es ist jedoch zu beachten, dass dies eine theoretische Prognose ist und die tatsächliche Laufzeit von verschiedenen Faktoren beeinflusst werden kann, wie z.B. der Alterung der Batterie, der Umgebungstemperatur und Selbstentladung. Ebenfalls geht die verwendete Formel von einem linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Kapazität aus, was in der Praxis nicht der Fall ist. Jedoch deutet die Messung darauf hin, dass die Laufzeit des Systems länger sein könnte als in der theoretischen Prognose erwartet, was auf eine gute Energieeffizienz des Prototyps hindeutet. Ein möglicher Erklärungsansatz für die längere Laufzeit liegt darin, dass die theoretische Prognose auf der konservativen Annahme basiert, wonach die Wachzeit des Raumbelungsplans 9 Minuten pro Woche beträgt. Eine Überschätzung der Wachzeit hat einen erheblichen Einfluss auf den berechneten Energieverbrauch, da der Energiebedarf im Wachmodus im Vergleich zum Deep-Sleep-Modus um etwa den Faktor 10 000 höher liegt. Ebenfalls könnte der Energieverbrauch in der Wachzeit geringer sein als angenommen, was ebenfalls zu einer längeren Laufzeit führen könnte.

2.2 Recherche zu Photovoltaikzellen für Innenlichtbedingungen

Die Recherche zu geeigneten Photovoltaikzellen für Innenlichtbedingungen ergab, dass Dünnschicht-Solarzellen, insbesondere solche auf Basis von amorphem Silizium oder organischen Materialien, eine vielversprechende Option darstellen. Diese Zellen sind in der Lage, auch bei geringer Beleuchtungsstärke eine nutzbare Leistung zu liefern. [2, 3] In diesem Bereich gibt es bereits kommerzielle Produkte, die speziell für den Einsatz unter Innenlichtbedingungen entwickelt wurden. Folgende Kriterien wurden bei der Auswahl berücksichtigt:

- Energieeffizienz bei geringer Beleuchtungsstärke
- Kosten und Verfügbarkeit
- Größe und Formfaktor

Basierend auf diesen Kriterien wurden mehrere Kandidaten untersucht. Folgende Photovoltaikzellenanbieter wurden als potenzielle Optionen identifiziert:

- Epishine – Indoor-Solarzellen [1]
- PowerFilm – Indoor-Light-Module [5]
- Panasonic – Amorton [4]

Diese Zellen besitzen alle eine hohe Effizienz bei geringer Beleuchtungsstärke und sind für den Einsatz in Innenräumen geeignet. Jeder Anbieter bietet verschiedene Modelle mit unterschiedlichen Leistungsstufen und Größen an, die je nach den Anforderungen des Projekts ausgewählt werden können. In Bezug auf die Verfügbarkeit sind die Produkte von PowerFilm und Panasonic leichter zugänglich, wobei PowerFilm schnellere Lieferzeiten bietet. Die Produkte von Epishine sind zwar vielversprechend, aber derzeit nur über eine direkte Anfrage erhältlich, was die Beschaffung erschwert. Die Kosten sind bei den Anbietern PowerFilm und Panasonic vergleichbar. Letztlich wurde die Entscheidung getroffen, die Produkte von PowerFilm zu verwenden, da sie eine gute Balance zwischen Effizienz, Verfügbarkeit und Kosten bieten. Es wurden verschiedene Modelle von PowerFilm untersucht, um die am besten geeignete Option für das Projekt zu identifizieren. Die INP-Modelle liefern eine Leistung von 10–30 μW bei einer Beleuchtungsstärke von 200 Lux, was für die Anforderungen des Projekts zu wenig sein könnte. Die INP-100-Modelle liefern eine Leistung von 100 μW bei 200 Lux, was ausreichend sein sollte, um den Energiebedarf des Systems zu decken. Die LL200-Modelle sind deutlich größer und liefern eine dementsprechend größere Leistung. Hervorstechend war das Modell LL200-3.6-75, da dieses eine Leistung von 206 μW bei 200 Lux liefert. Ebenfalls liegt die Betriebsspannung bei 2,4 V, was höher als bei anderen Modellen der Reihe ist. Die Betriebsspannung ist ein wichtiger Faktor, da sie die Effizienz der Energiegewinnung beeinflussen kann. insbesondere für den Laderegler, der die Energie der Photovoltaikzelle in den Akku einspeist, ist es wichtig, dass die Betriebsspannung der Zelle ausreichend hoch ist, um eine effiziente Ladung zu ermöglichen. Aus diesen Gründen wurde die PowerFilm LL200-3.6-75 als die am besten geeignete Option für das Projekt ausgewählt (Abbildung 2).



Abbildung 2: PowerFilm LL200-3.6-75 Photovoltaikzelle

2.3 Recherche zu Laderegeln für Photovoltaikzellen

Die Recherche zu geeigneten Laderegeln für die ausgewählte Photovoltaikzelle ergab dass es verschiedene Optionen gibt, die für die Anforderungen des Projekts geeignet sein könnten. Bei der Auswahl eines Ladereglers wurden folgende Kriterien berücksichtigt:

- Kompatibilität mit der Betriebsspannung der Photovoltaikzelle
- Effizienz der Energieumwandlung
- Kosten und Verfügbarkeit
- Größe und Formfaktor

3 Erläuterung zur Nutzung von KI

KI-Tools wurden in dieser Arbeit als assistives Werkzeug im Implementierungs- und Schreibprozess verwendet. Im Schreibprozess diente ChatKI als Unterstützung für grobe Strukturierungsideen. ChatGPT wurde genutzt, um Rechtschreib- und Grammatikfehler im Fließtext zu überprüfen und Verbesserungsvorschläge zu erhalten. Ebenfalls wurde ChatGPT im Implementierungsprozess verwendet, um Fehler im Code zu finden. Es wurden keine Inhalte ungeprüft übernommen.

Literatur

- [1] Epishine. Indoor solar cells, 2026. Zugriff am 18. Februar 2026.
- [2] Gayoung Kim, Jung Wook Lim, Jieun Kim, Sun Jin Yun, and Min A Park. Transparent thin-film silicon solar cells for indoor light harvesting with conversion efficiencies of 36% without photodegradation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(24):27122–27130, 2020. PMID: 32378875.
- [3] Snehangshu Mishra, Subrata Ghosh, Binita Boro, Dinesh Kumar, Shivam Porwal, Mrittika Paul, Himanshu Dixit, and Trilok Singh. Solution-processed next generation thin film solar cells for indoor light applications. *Energy Adv.*, 1:761–792, 2022.
- [4] Panasonic Corporation. Amorton amorphous silicon solar cells, 2026. Zugriff am 18. Februar 2026.
- [5] PowerFilm Solar, Inc. Indoor light series – electronic component solar panels, 2026. Accessed: 18 February 2026.