

# BEWERTUNG KOSTENGÜNSTIGER MICROCONTROLLER FÜR ENERGIEMONITORING, LAST- UND ENERGIEMANAGEMENT

Thomas BERNHARD<sup>\*1</sup>, Sofia MARAGKOU<sup>2</sup>, Stefan WILKER<sup>2</sup>, Thilo SAUTER<sup>2,3</sup>

## Inhalt

Die zunehmende Anzahl volatiler erneuerbarer Energiequellen und elektrischer Verbraucher stellt das Stromnetz vor große Herausforderungen in Form von Lastspitzen durch hohen Bedarf oder Energieüberschuss. Als Gegenmaßnahme ist eine intelligente Koordination des Energieflusses notwendig, bei der flexible Komponenten ihr Verhalten anpassen, um das Lastungleichgewicht zu reduzieren. Diese Arbeit beschäftigt sich speziell mit der untersten Ebene des Stromnetzes, also individuellen Haushalten mit gängigen Komponenten wie z.B. Photovoltaikanlagen, Wärmepumpen, Ladestationen für E-Autos, oder elektrische Speicher. Während diese Geräte üblicherweise eine Kommunikationsmöglichkeit anbieten, können sie im Allgemeinen keine Informationen untereinander austauschen, vor allem nicht zwischen verschiedenen Herstellern [1]. Dadurch geht bei rund 500.000 Haushalten in Österreich mit Photovoltaik Anlage ein großer Teil der verfügbaren Flexibilität verloren und die fehlende Infrastruktur für präventive und kurative Eingriffe durch die Netzbetreiber stellt das Stromnetz vor große Herausforderungen. Dies motiviert einen zentralen Controller, der mit den Komponenten kommuniziert, das Energiemanagement übernimmt, und mit einer Schnittstelle zum Netzbetreiber auch für die Einhaltung von Lastlimits sorgen kann.

Um eine weite Verbreitung zu ermöglichen, muss der Controller möglichst kostengünstig und klein genug sein, um in bestehenden Schaltschränken Platz zu finden. Weiters müssen alle gängigen Protokolle (z.B. HTTP und Modbus) unterstützt werden, wofür Wi-Fi und Ethernet notwendig sind. Aus Sicherheitsgründen und um eine hohe Akzeptanz zu gewährleisten, dürfen private Daten das lokale Netzwerk nicht verlassen. Daher muss der Controller über ausreichende Rechenleistung und Speicher verfügen, um Energieplanungsalgorithmen, einschließlich Energieprognosen, auf dem Gerät auszuführen.

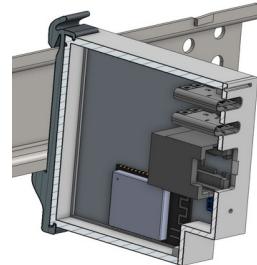


Abbildung 1: 3D Modell

Angesichts dieser Anforderungen hinsichtlich Kommunikation, Rechenleistung und Speicher kommen als Hardware beliebte Mikrocontroller-Serien wie der ESP32 und STM32 oder leistungsfähigere Embedded-Linux-Plattformen in Frage. In Bezug auf Preis und Größe sind die ESP32-Module konkurrenzlos, wenn man die vollständig zertifizierte integrierte Wi-Fi-Funktion, den integrierten Flash-Speicher und den PSRAM berücksichtigt, was auch die Entwicklungskosten und die Markteinführungszeit reduziert. Obwohl in den Bereichen Energieprognose und Energieplanung umfangreiche Forschungsarbeiten vorliegen, fehlen in den bestehenden Arbeiten Informationen über die Rechenkomplexität und den Speicherverbrauch der verwendeten Algorithmen sowie über die Machbarkeit ihrer Ausführung auf Geräten mit begrenzten Ressourcen.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, die Single-Core (ESP32-S2) und Dual-Core (ESP32-S3) Mikrocontrollersysteme der ESP32 S-Serie in einer Energiemonitoring- und Energieplanungsanwendung zu benchmarken und zu vergleichen. Als beispielhafte rechen- und speicherintensive Aufgaben dienen ein Mixed Integer Linear Programming (MILP) Ansatz zur Energieplanung [2] und verschiedene Algorithmen zur kurzfristigen Energieprognose von Photovoltaikanlagen, darunter k-Means Clustering [3] und eine auf Neuronalen Netzwerken basierte Variante. Damit soll evaluiert werden, ob solch kostengünstige Microcontroller auch für umfangreiches Energiemanagement eingesetzt werden können, oder ob leistungsstärkere, aber dafür auch wesentlich teurere und größere System on Modules notwendig sind.

---

<sup>1</sup> gridoo GmbH, Gertrude-Fröhlich-Sandner-Straße 2-4, 1100 Wien, thomas.bernhard@gridoo.com

<sup>2</sup> TU Wien, Institut für Computertechnik, E384, Wien, vorname.nachname@tuwien.ac.at

<sup>3</sup> Universität für Weiterbildung Krems, Department für Integrierte Sensorsysteme, Wiener Neustadt

## Methodik

Wir präsentieren ein flexibles Testbench-Framework um reale Anwendungsfälle zu simulieren und ein reproduzierbares Benchmarking zu ermöglichen. In einem lokalen Netzwerk befinden sich der zentrale Controller und verschiedenen Geräte, die üblicherweise in Haushalten zum Energiemonitoring verwendet werden (Shelly Pro 3EM, Shelly Plug S Gen3, TQ SU100, und Homewizard P1 Meter). Der Controller fragt sekündlich die angeschlossenen Komponenten nach ihrem aktuellen Status, wie z.B. dem Stromverbrauch und speichert diesen lokal ab. Zusätzlich besteht eine WebSocket Verbindung zu einer Serverapplikation, mit welcher Daten bidirektional ausgetauscht werden können: Einerseits vom Controller zum Server, um die gesammelten Daten in einer Monitoring Applikation visualisieren zu können, und andererseits vom Server zum Controller, um relevante Informationen für den Echtzeitbetrieb und die Energieplanung zu erhalten (z.B. dynamische Tarife, Wettervorhersagen, oder Lastlimits vom Netzbetreiber). In diesem Setup werden zwei verschiedene Szenarien simuliert: Das erste Szenario beschränkt sich auf den Energiemonitoring Use-Case in verschiedenen großen Setups, um die Prozessorauslastung in Abhängigkeit von der Anzahl an Geräten zu messen. Im zweiten Szenario werden zusätzlich zum Energiemonitoring auch noch Energieplanungsalgorithmen inklusive Machine Learning basierter Energieprognosen gestartet.

Als zentrale Metrik dient die Leerlaufzeit der Prozessorkerne des Controllers, um die Systemauslastung zu messen. Im zweiten Szenario werden zusätzlich die Laufzeit der einzelnen Algorithmen sowie deren Speicherbedarf aufgezeichnet.

## Ergebnisse

Die Auswertung zeigt, dass im Energiemonitoring Szenario beide Mikrocontroller-Systeme in der Lage sind, selbst in einem umfangreichen Setup mit 8 Komponenten zuverlässig zu kommunizieren und den Prozessor dabei im Schnitt nur zu 22% (ESP32-S2) bzw. 10% (ESP32-S3, gemittelt über beide Prozessorkerne) auslasten. Die offensichtliche zusätzliche Rechenleistung des Dual-Core Moduls (ESP32-S3) macht sich vor allem im zweiten Szenario mit zusätzlichen rechenintensiven Aufgaben bemerkbar, welche durchschnittlich dreimal so schnell abgearbeitet wurden. Der Hauptvorteil des ESP32-S3-Moduls liegt jedoch in der größeren RAM- und Flash-Speicherkonfiguration, da der begrenzte Speicher als limitierender Faktor identifiziert wurde. Insbesondere bei der MILP basierten Energieplanung, welche in diesem Fall rund 1Mb an Arbeitsspeicher und damit schon rund die Hälfte des verfügbaren Heap-Speichers des ESP32-S2 Moduls benötigt.

Die Ergebnisse unterstreichen die Eignung kostengünstiger Mikrocontroller wie der ESP32 S-Serie für Energiemonitoringanwendungen und zeigen ihr Potenzial für grundlegende Energieprognosen und Energiemanagementaufgaben. Insbesondere der ESP32-S3 bietet einen idealen Ausgangspunkt für die Entwicklung einer kostengünstigen Lösung, die eine weite Verbreitung ermöglicht, um die Energiewende durch die Nutzung von Flexibilitäten auf der unterste Netzebene maßgeblich voranzutreiben.

## Referenzen

- [1] A. Veichtlbauer, "Convergent interoperability stack for smart grid ict infrastructures," Ph.D. dissertation, Technische Universität Wien, 2023.
- [2] E. Gomes, L. Pereira, and H. Morais, "Energy resources scheduling in energy communities: A comparison between mixed integer linear programming and hybrid-adaptive differential evolution with decay function," in 2023 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), 2023, pp. 1–5.
- [3] X. Dong, S. Deng, and D. Wang, "A short-term power load forecasting method based on k-means and svm," Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, vol. 13, no. 11, pp. 5253–5267, 2022.

## Danksagung

Das Projekt OptiFlex wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds und des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur gefördert und im Rahmen des Energieforschungsprogramms 2024 durchgeführt.