

Clock-Tree-Aware Resource-Consumption Models for Embedded SoC Platforms

Masterarbeitsvortrag

21. Oktober 2022

Eva Dengler

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



Lehrstuhl für Verteilte Systeme
und Betriebssysteme



Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

Resource Consumption of Embedded SoC Platforms



```
main:
```

```
    while (true):
```

```
        task1();
```

```
        task2();
```

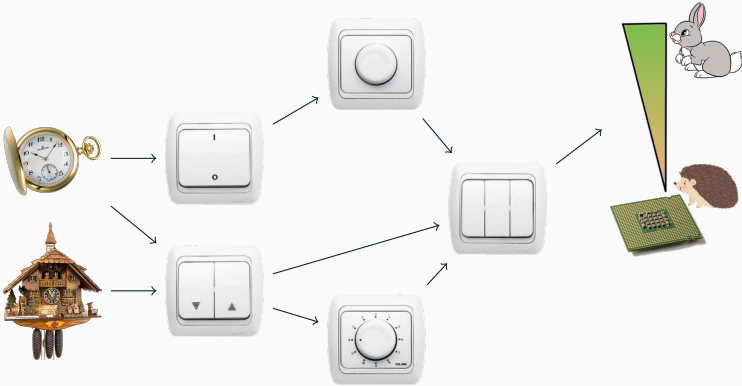
```
        task3();
```

```
        idle();
```

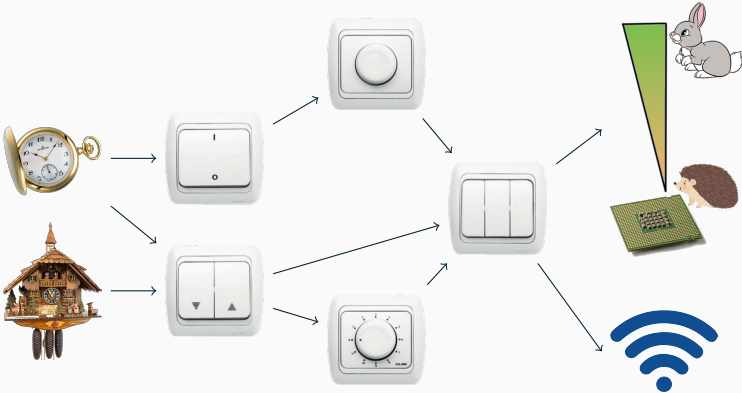


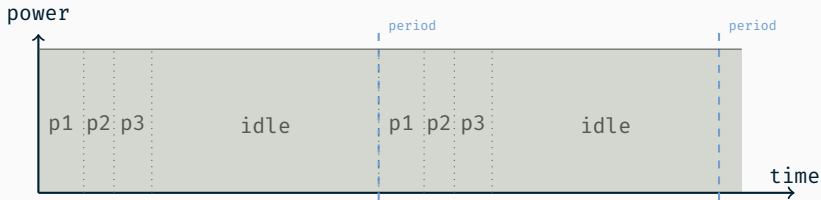


Clock Tree

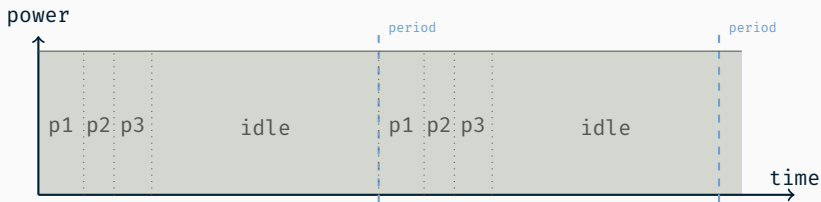


Clock Tree



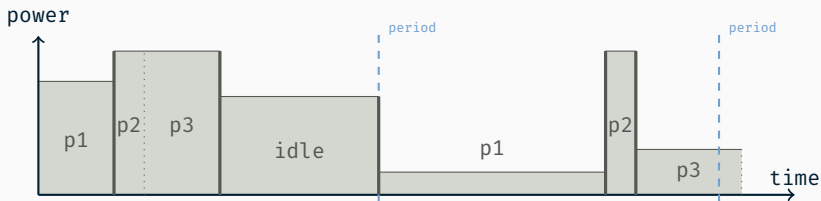


All-Always-On-Ansatz



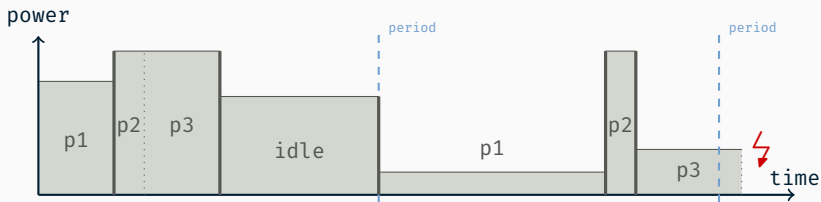
All-Always-On-Ansatz

- × Minimierung des Energieverbrauchs



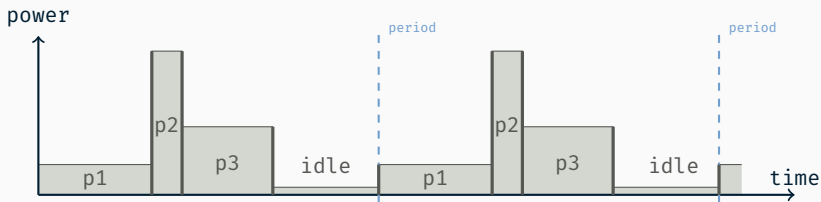
Dynamischer Ansatz: Rekonfiguration zur Laufzeit

- Minimierung des Energieverbrauchs
- Echtzeitgarantien



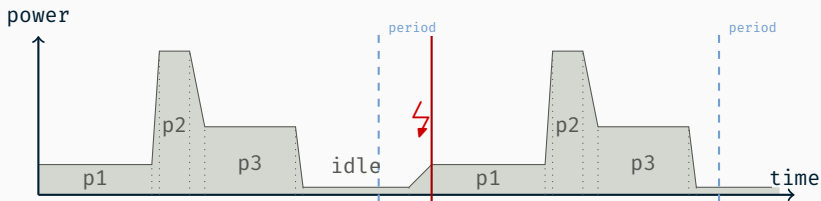
Dynamischer Ansatz: Rekonfiguration zur Laufzeit

- Minimierung des Energieverbrauchs
- × Echtzeitgarantien



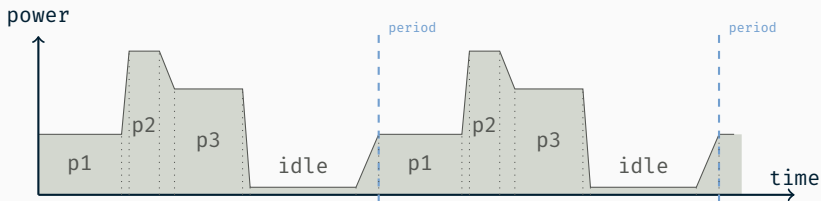
Statischer Ansatz: Analyse vor Laufzeit

- Minimierung des Energieverbrauchs
- Echtzeitgarantien



Statischer Ansatz ohne Rekonfigurationskosten

- Minimierung des Energieverbrauchs
- × Echtzeitgarantien
- × Betrachtung der Rekonfigurationskosten

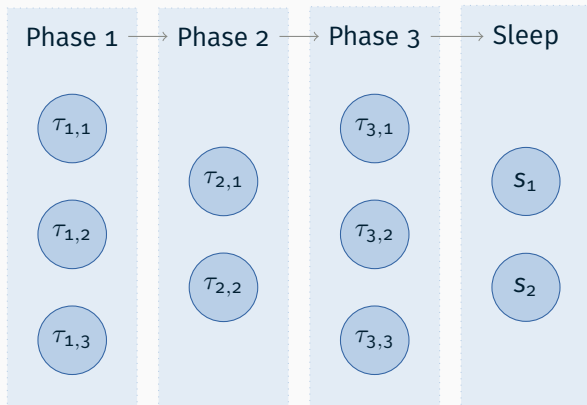


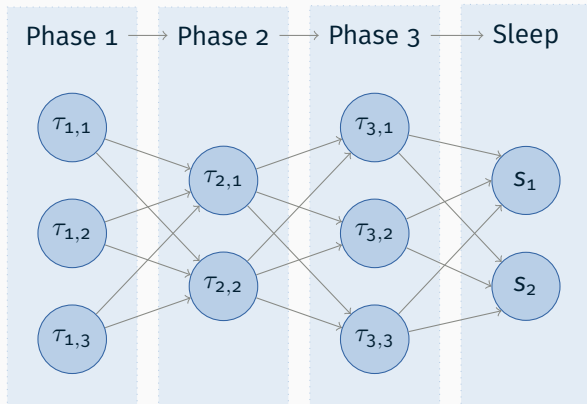
Statischer Ansatz mit Rekonfigurationskosten

- ✓ Minimierung des Energieverbrauchs
- ✓ Echtzeitgarantien
- ✓ Betrachtung der Rekonfigurationskosten

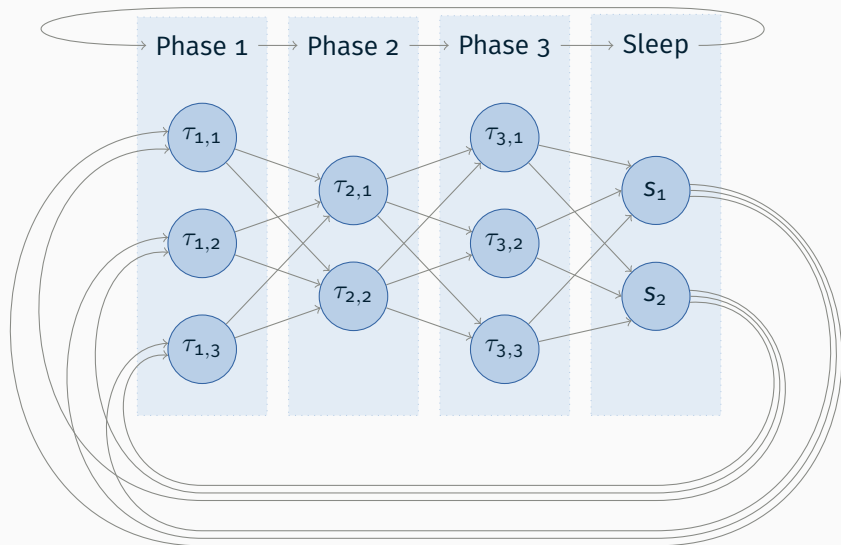
Phase 1 → Phase 2 → Phase 3 → Sleep

Konzept

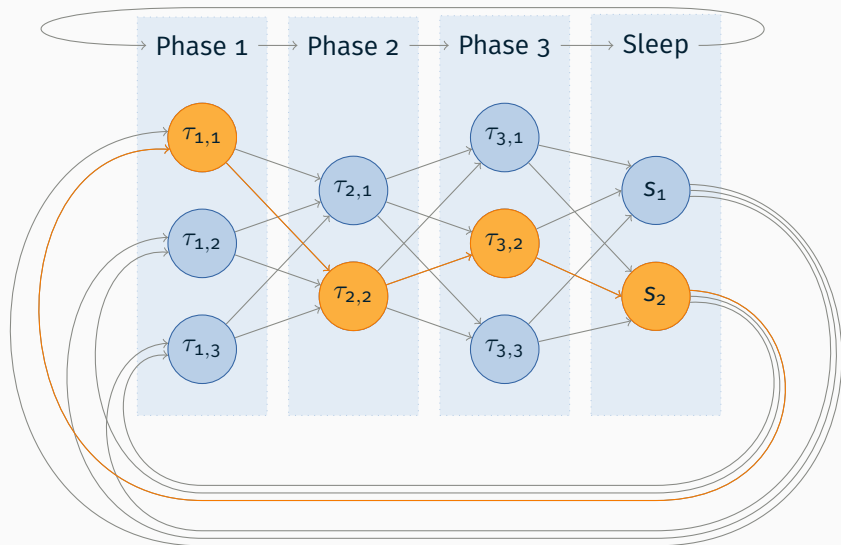




Konzept



Konzept



min

$$\min \underbrace{\sum_{i=0}^{x-1} \sum_{j=0}^{f_i-1} n_{i,j} e_{i,j}}_{\text{Konfigurationen}}$$

$$\min \underbrace{\sum_{i=0}^{x-1} \sum_{j=0}^{f_i-1} n_{i,j} e_{i,j}}_{\text{Konfigurationen}} + \underbrace{\sum_{j=0}^{f_s-1} n_{s,j} e_{s,j}}_{\text{Schlafzustand}}$$

$$\min \underbrace{\sum_{i=0}^{x-1} \sum_{j=0}^{f_i-1} n_{i,j} e_{i,j}}_{\text{Konfigurationen}} + \underbrace{\sum_{j=0}^{f_s-1} n_{s,j} e_{s,j}}_{\text{Schlafzustand}} + \underbrace{\sum_{i=0}^{x-1} \sum_{j=0}^{f_i-1} \sum_{j'=0}^{f_{(i+1)}-1} n_{i,j \rightarrow (i+1),j'} e_{i,j \rightarrow (i+1),j'}}_{\text{Rekonfigurationskosten}}$$

$$\min \sum_{i=0}^{x-1} \sum_{j=0}^{f_i-1} n_{i,j} e_{i,j} + \sum_{j=0}^{f_s-1} n_{s,j} e_{s,j} + \sum_{i=0}^{x-1} \sum_{j=0}^{f_j-1} \sum_{j'=0}^{f_{(i+1)}-1} n_{i,j \rightarrow (i+1),j'} e_{i,j \rightarrow (i+1),j'}$$

- eine Konfiguration pro Phase

$$\forall i \in \{0, \dots, x\} : \sum_{j=0}^{f_i-1} n_{i,j} = 1$$

$$\min \sum_{i=0}^{x-1} \sum_{j=0}^{f_i-1} n_{i,j} e_{i,j} + \sum_{j=0}^{f_s-1} n_{s,j} e_{s,j} + \sum_{i=0}^{x-1} \sum_{j=0}^{f_i-1} \sum_{j'=0}^{f_{(i+1)}-1} n_{i,j \rightarrow (i+1),j'} e_{i,j \rightarrow (i+1),j'}$$

- eine Konfiguration pro Phase

$$\forall i \in \{0, \dots, x\} : \sum_{j=0}^{f_i-1} n_{i,j} = 1$$

- #eingehende aktive Kanten = #ausgehende aktive Kanten

$$\forall i \in \{0, \dots, x\} : \forall j \in \{0, \dots, f_i - 1\} : n_{i,j} = \sum_{j'=0}^{f_{(i-1)}-1} n_{(i-1),j' \rightarrow i,j}$$

$$\forall i \in \{0, \dots, x\} : \forall j \in \{0, \dots, f_i - 1\} : n_{i,j} = \sum_{j'=0}^{f_{(i+1)}-1} n_{i,j \rightarrow (i+1),j'}$$

$$\min \sum_{i=0}^{x-1} \sum_{j=0}^{f_i-1} n_{i,j} e_{i,j} + \sum_{j=0}^{f_s-1} n_{s,j} e_{s,j} + \sum_{i=0}^{x-1} \sum_{j=0}^{f_i-1} \sum_{j'=0}^{f_{(i+1)}-1} n_{i,j \rightarrow (i+1),j'} e_{i,j \rightarrow (i+1),j'}$$

- eine Konfiguration pro Phase

$$\forall i \in \{0, \dots, x\} : \sum_{j=0}^{f_i-1} n_{i,j} = 1$$

- #eingehende aktive Kanten = #ausgehende aktive Kanten

$$\forall i \in \{0, \dots, x\} : \forall j \in \{0, \dots, f_i - 1\} : n_{i,j} = \sum_{j'=0}^{f_{(i-1)}-1} n_{(i-1),j' \rightarrow i,j}$$

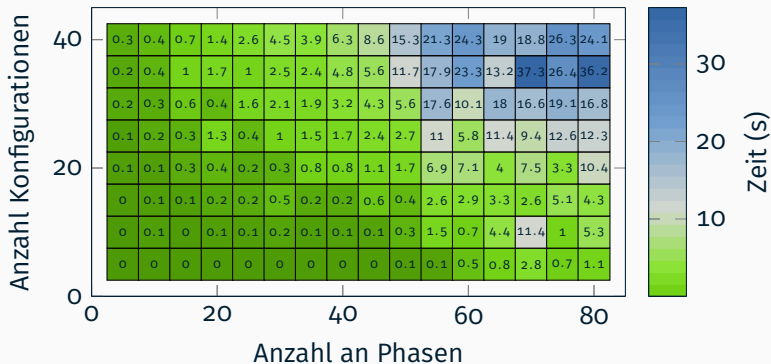
$$\forall i \in \{0, \dots, x\} : \forall j \in \{0, \dots, f_i - 1\} : n_{i,j} = \sum_{j'=0}^{f_{(i+1)}-1} n_{i,j \rightarrow (i+1),j'}$$

- alle Zeiten aufsummiert ergeben Hyperperiode

$$\sum_{i=0}^{x-1} \sum_{j=0}^{f_i-1} n_{i,j} t_{i,j} + \sum_{j=0}^{f_s-1} n_{s,j} t_{s,j} + \sum_{i=0}^x \sum_{j=0}^{f_i-1} \sum_{j'=1}^{f_{(i+1)}-1} n_{i,j \rightarrow (i+1),j'} t_{i,j \rightarrow (i+1),j'} = H$$

Synthetische Benchmarks mit Gurobi

Benötigte Zeit:



Problem gelöst?

- Minimierung des Energieverbrauchs
- Echtzeitgarantien
- Betrachtung der Rekonfigurationskosten

Problem gelöst?

- ✓ Minimierung des Energieverbrauchs
⇒ minimierendes Optimierungsproblem
- Echtzeitgarantien
- Betrachtung der Rekonfigurationskosten

Problem gelöst?

- ✓ Minimierung des Energieverbrauchs
⇒ minimierendes Optimierungsproblem
- ✓ Echtzeitgarantien
⇒ Nebenbedingung: Zeitverbrauch = Hyperperiode
- Betrachtung der Rekonfigurationskosten

Problem gelöst!

- ✓ Minimierung des Energieverbrauchs
⇒ minimierendes Optimierungsproblem
- ✓ Echtzeitgarantien
⇒ Nebenbedingung: Zeitverbrauch = Hyperperiode
- ✓ Betrachtung der Rekonfigurationskosten
⇒ Teil der Kostenfunktion des Optimierungsproblems

Problem gelöst!

- ✓ Minimierung des Energieverbrauchs
⇒ minimierendes Optimierungsproblem
- ✓ Echtzeitgarantien
⇒ Nebenbedingung: Zeitverbrauch = Hyperperiode
- ✓ Betrachtung der Rekonfigurationskosten
⇒ Teil der Kostenfunktion des Optimierungsproblems
- ✓ In vertretbarer Zeit lösbar

Problem gelöst!

- ✓ Minimierung des Energieverbrauchs
⇒ minimierendes Optimierungsproblem
- ✓ Echtzeitgarantien
⇒ Nebenbedingung: Zeitverbrauch = Hyperperiode
- ✓ Betrachtung der Rekonfigurationskosten
⇒ Teil der Kostenfunktion des Optimierungsproblems
- ✓ In vertretbarer Zeit lösbar
- ✓ Anwendungsgewahre Optimierung

Problem gelöst!

- ✓ Minimierung des Energieverbrauchs
⇒ minimierendes Optimierungsproblem
- ✓ Echtzeitgarantien
⇒ Nebenbedingung: Zeitverbrauch = Hyperperiode
- ✓ Betrachtung der Rekonfigurationskosten
⇒ Teil der Kostenfunktion des Optimierungsproblems
- ✓ In vertretbarer Zeit lösbar
- ✓ Anwendungsgewahre Optimierung
- ✓ Betrachtung des Gesamtsystems

Anwendbar auf echter Hardware ?

- Zeitverhalten
- Energiekosten
- Anwendungsszenario

Anwendbar auf echter Hardware → ESP32-C3

- Zeitverhalten
- Energiekosten
- Anwendungsszenario

- Zeit für Länge einer Phase

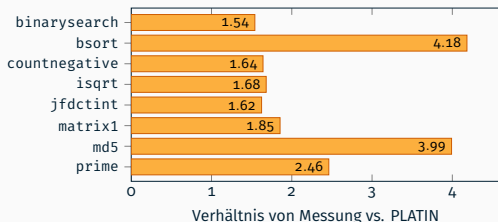
- Zeit für Rekonfigurationen

- Zeit für Länge einer Phase
 - WCET von CPU-Abschnitten
 - Zeit von Gerätekommunikation
- Zeit für Rekonfigurationen

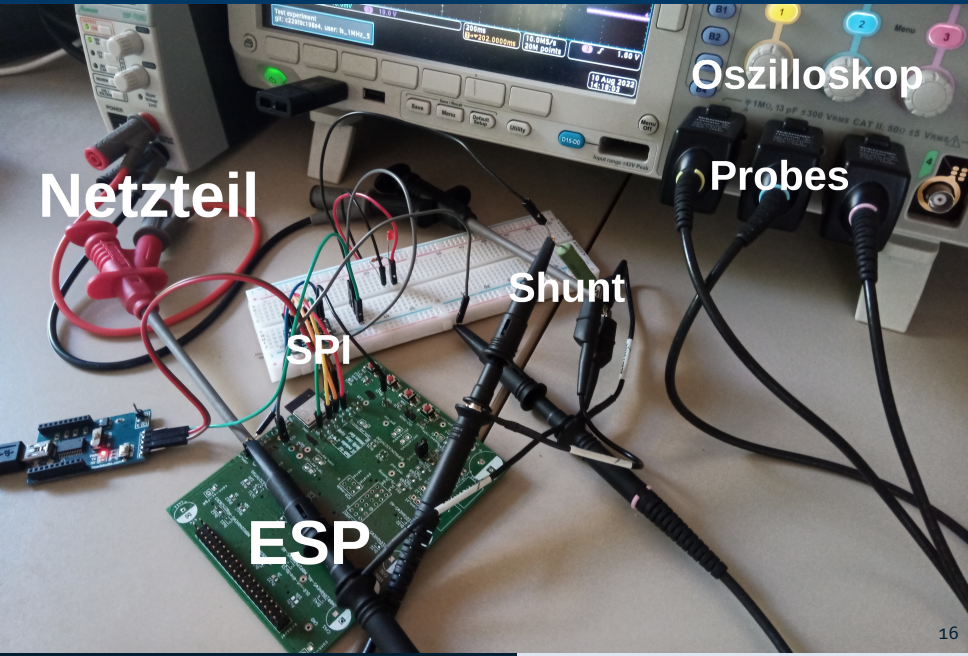
Erweiterung von *PLATIN* für ESP32-C3

- Datenblatt: keine Informationen zu Zeitverhalten
→ Auslesen der CPU-eigenen Performance Counter

Evaluation des Modells mit *TACLe-Bench* Benchmark-Suite



Messungen mit dem Oszilloskop



Oszilloskop

Netzteil

Probes

Shunt

SPI

ESP

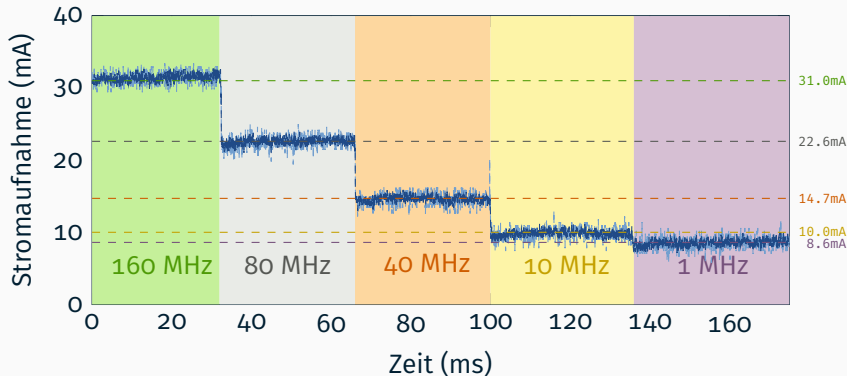
Messungen für

- CPU: 160MHz, 80MHz, 40MHz, 10MHz, 1MHz
- Peripherie: SPI, I2C, LED
- Schlafzustände: Light Sleep, Deep Sleep
- Rekonfigurationen

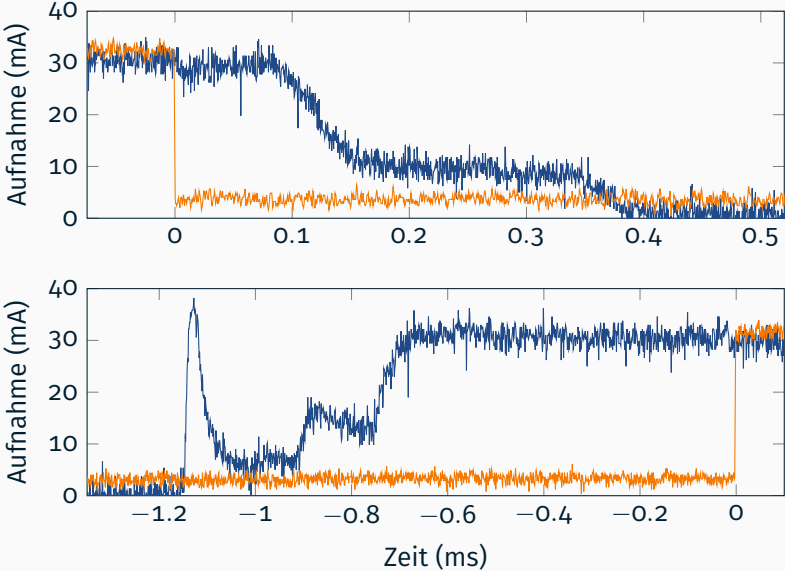
Messungen für

- **CPU: 160MHz, 80MHz, 40MHz, 10MHz, 1MHz**
- Peripherie: SPI, I2C, LED
- **Schlafzustände: Light Sleep, Deep Sleep**
- Rekonfigurationen

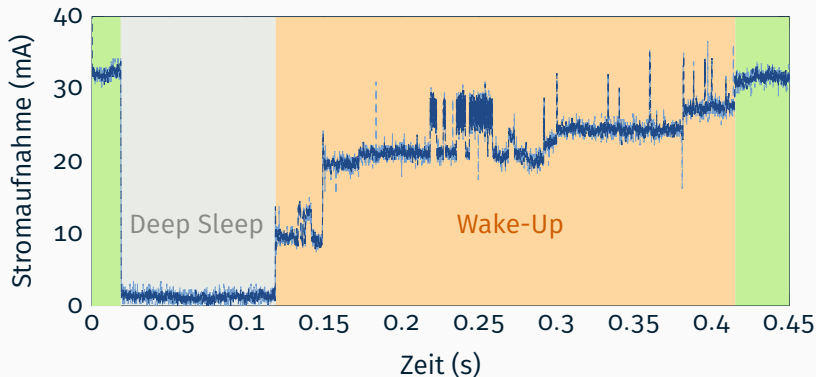
Energieverhalten des ESP32-C3: Aktive CPU



Zeit- und Energieverhalten des ESP32-C3: Light Sleep



Zeit- und Energieverhalten des ESP32-C3: 100ms Deep Sleep



Anwendbar auf echter Hardware → ESP32-C3

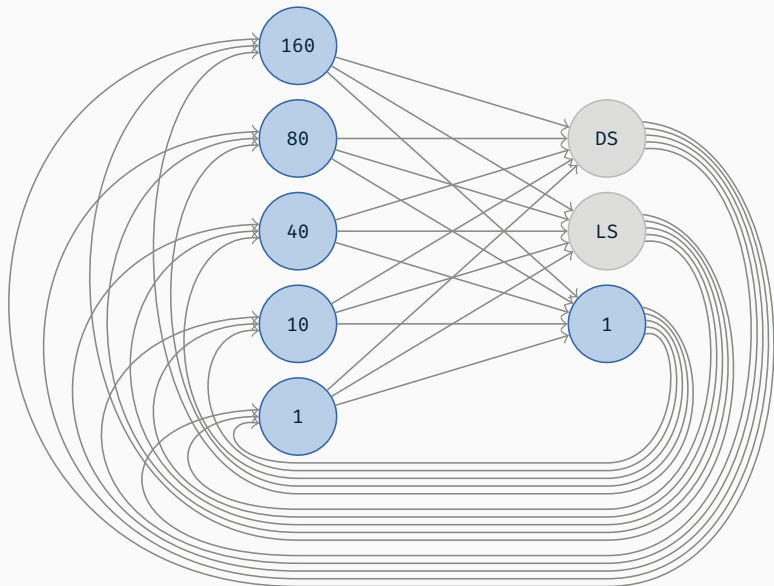
- Zeitverhalten
- Energiekosten
- Anwendungsszenario

Anwendbar auf echter Hardware → ESP32-C3

- ✓ Zeitverhalten
- ✓ Energiekosten
- Anwendungsszenario

```
while (true):  
    fibonacci(1000000);  
    idle();
```


Anwendung: ein CPU-Task



Evaluationssetup:

- PLATIN: 8000031 Zyklen für Fibonacci-Berechnung
→ mindestens 50ms bei 160MHz
- Rekonfigurationskosten: bis zu 300ms
- Untersuchung mit variabler Periodenlänge

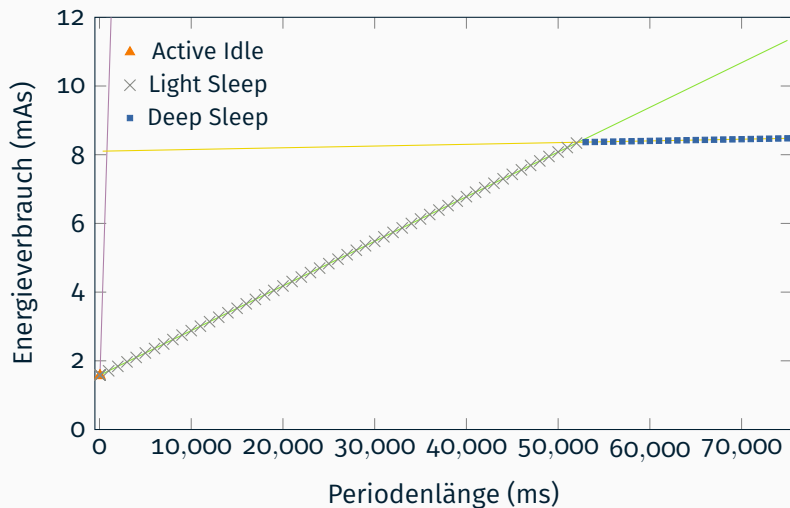
Evaluationssetup:

- PLATIN: 8000031 Zyklen für Fibonacci-Berechnung
→ mindestens 50ms bei 160MHz
- Rekonfigurationskosten: bis zu 300ms
- Untersuchung mit variabler Periodenlänge

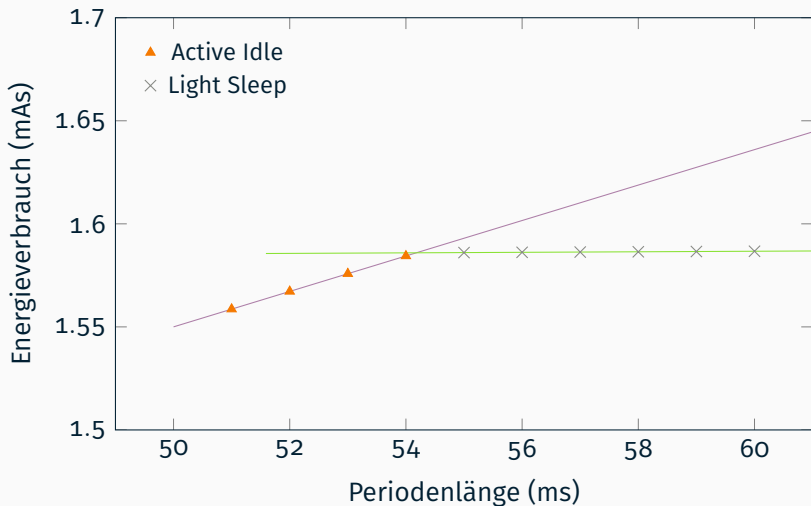
Ergebnis:

- CPU-Frequenz: immer 160MHz → *race-to-idle*-Verhalten
- Schlafzustand...

Anwendung: Wahl des Schlafzustandes



Anwendung: Übergang Active Idle zu Light Sleep



Ergebnis:

- CPU-Frequenz: *race-to-idle*-Verhalten
- Schlafzustand:
großer Einfluss der Rekonfigurationskosten

Weitere Evaluation:

System mit mehreren Phasen sowie Gerätekommunikation

Ergebnis:

- CPU-Frequenz: *race-to-idle*-Verhalten
- Schlafzustand:
großer Einfluss der Rekonfigurationskosten

Weitere Evaluation:

System mit mehreren Phasen sowie Gerätekommunikation

Zusammenfassend:

Modell bestimmt optimale Konfiguration für minimale Kosten

Anwendbar auf echter Hardware → ESP32-C3

- ✓ Zeitverhalten
- ✓ Energiekosten
- Anwendungsszenario

Anwendbar auf echter Hardware → ESP32-C3

- ✓ Zeitverhalten
- ✓ Energiekosten
- ✓ Anwendungsszenario

- ✓ Entwicklung eines mathematischen Modells
 - ✓ Bestimmung des minimalen Energieverbrauchs
 - ✓ Betrachtung der Rekonfigurationskosten
 - ✓ Betrachtung der Gerätekonfigurationen

- ✓ Anwendbar auf realer Hardware
im Beispiel: ESP32-C3

```
while (true):  
  
    fibonacci(n1);  
  
    i2c_communication();  
  
    fibonacci(n2);  
  
    i2c_communication();  
  
    fibonacci(n3);  
  
    idle();
```