

Energy-Constrained Real-Time Systems and Their Worst-Case Analyses

Energiebeschränkte Echtzeitsysteme und ihre Worst-Case-Analysen

12. März 2021

Vortrag Promotionspreis der Fachgruppe Betriebssysteme

Peter Wägemann

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

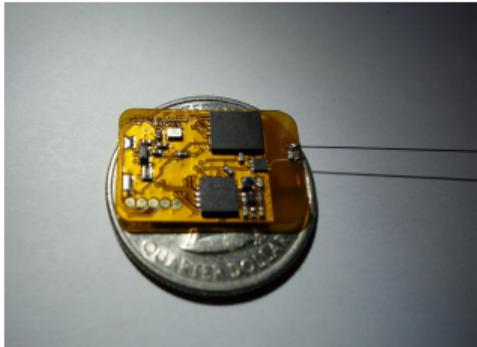
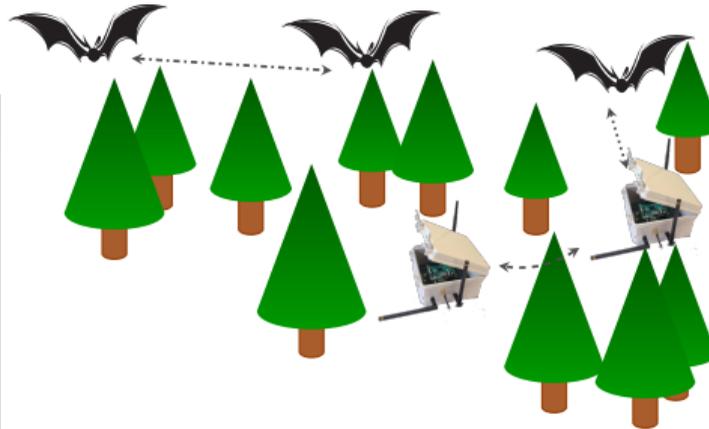


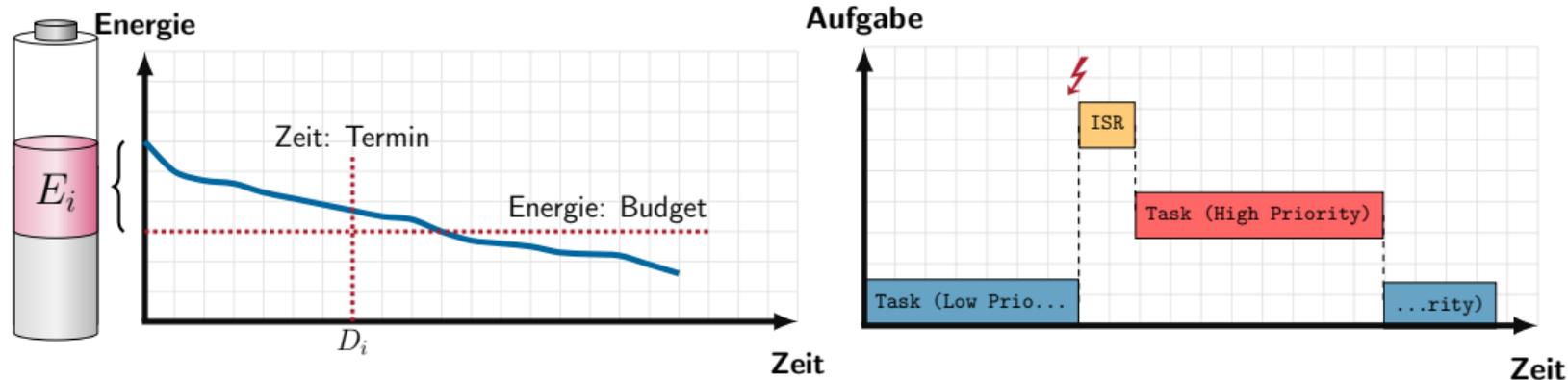
Lehrstuhl für Verteilte Systeme
und Betriebssysteme



FRIEDRICH-ALEXANDER
UNIVERSITÄT
ERLANGEN-NÜRNBERG

TECHNISCHE FAKULTÄT





1. Echtzeitanforderung: *Worst-Case Execution Time (WCET)*

2. Energiebeschränkung

- Persistente Sicherung von Daten (rechtzeitig vor Batterieerschöpfung)
- **Garantierte Ausführung: *Worst-Case Energy Consumption (WCEC)***
- Nebenläufige Aktivitäten: Verbrauch von Start → Ende von Aufgabe

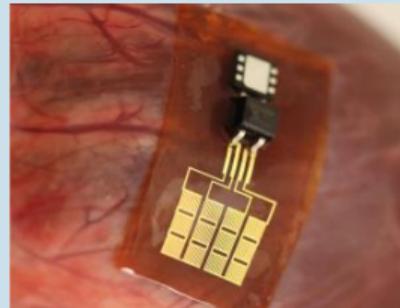
👉 **Systemweite Analysen** notwendig



Sicherheitskritische Systeme: Herzschrittmacher \rightsquigarrow harte Anforderungen

1. Echtzeit

- Sensorik: Herzaktivität
- Aktorik: Impulse

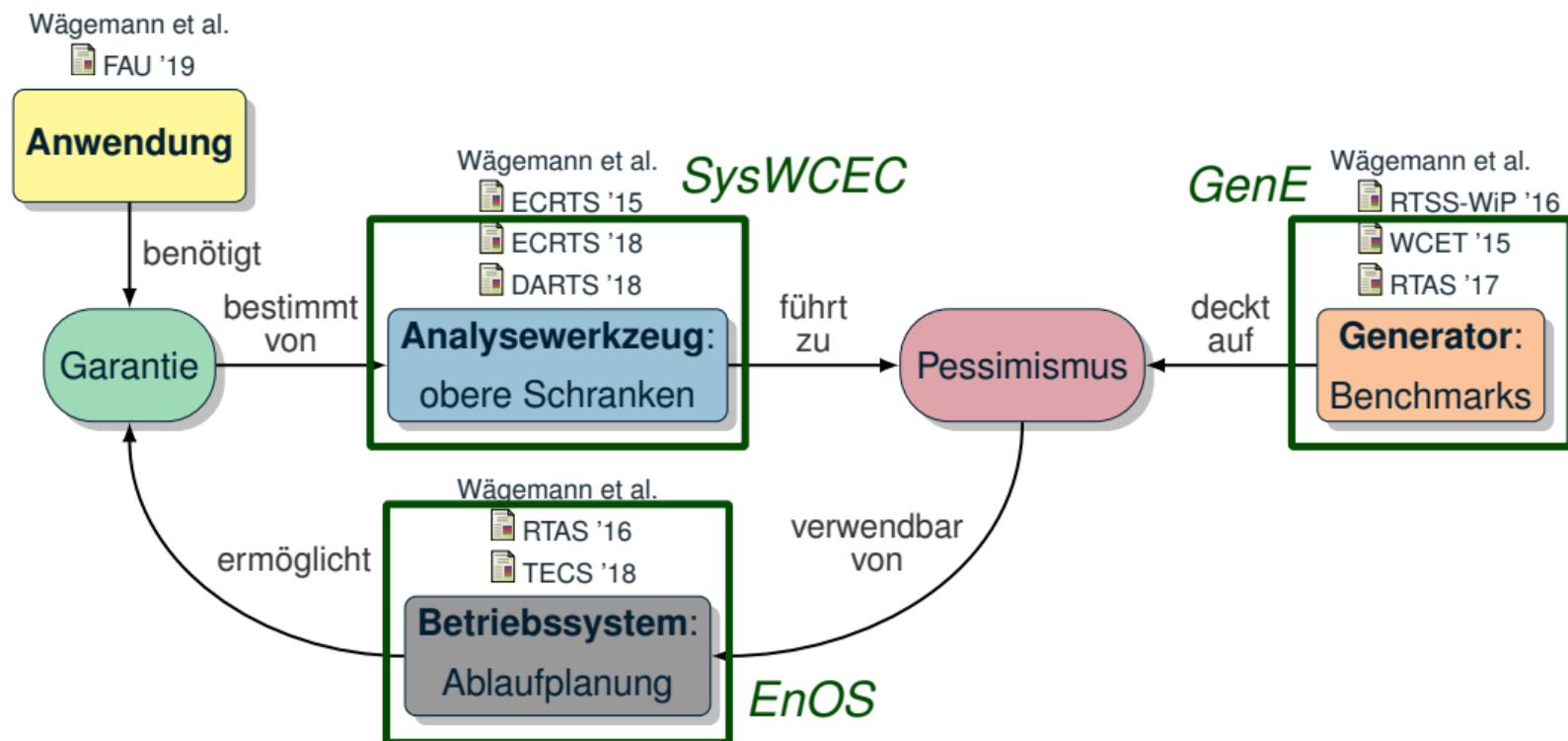


2. Energie

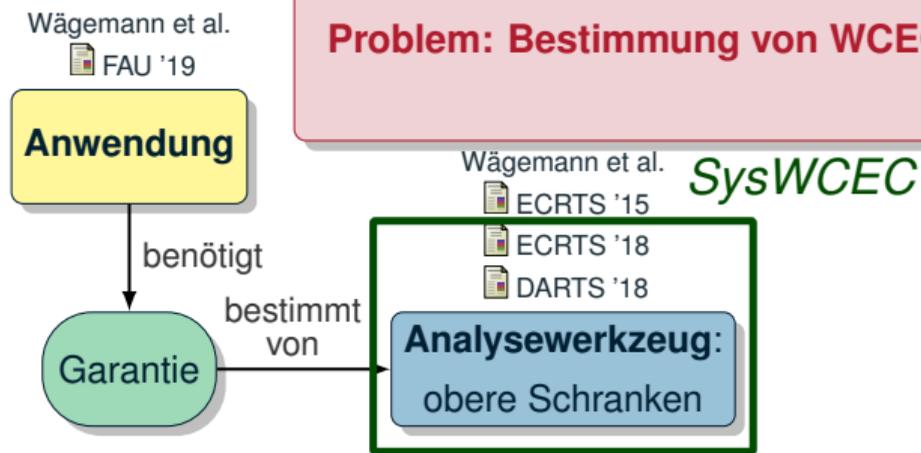
- Batteriebetriebene Anwendungen
- Aktuelle Entwicklungen: Energie-Harvesting-Mechanismen
- Ablaufplanung & Überwachung von Ressourcen zur Laufzeit

- Nebenläufige Aktivitäten: Verbrauch von Start \rightarrow Ende von Aufgabe

 **Systemweite Analysen** notwendig



Problem: Bestimmung von WCEC-Schranken für Systeme mit Geräten



Whole-System Worst-Case Energy-Consumption Analysis for Energy-Constrained Real-Time Systems

Euromicro Conference on Real-Time Systems (**ECRTS '18**), *Outstanding Paper*

Whole-System WCEC Analysis for Energy-Constrained Real-Time Systems (Artifact)

Dagstuhl Artifacts Series (**DARTS '18**)

Prozessor

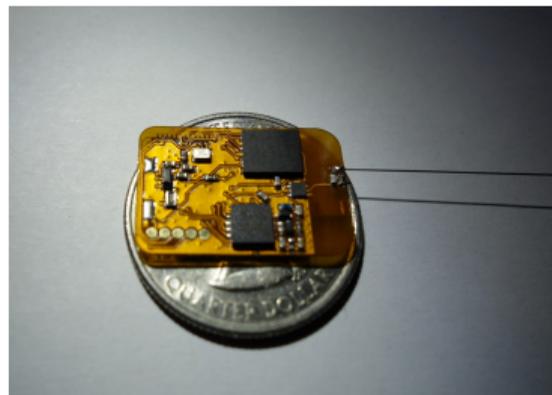
- Ein Rechenkern
- Reduzierte Komplexität

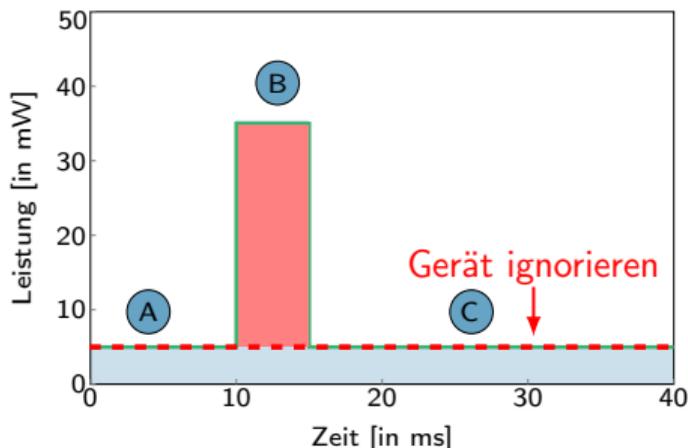
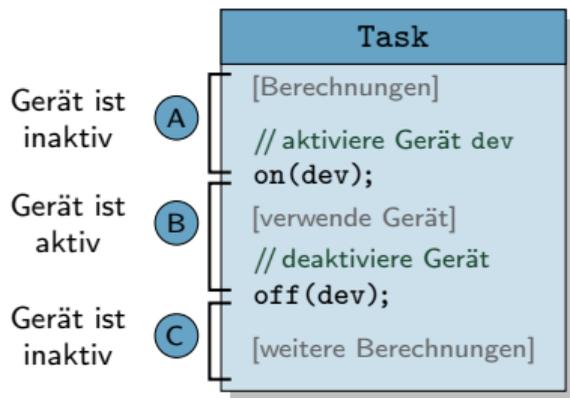
Software

- ☞ *Christians Systemmodell*
 - Ablaufplanung mit festen Prioritäten
 - **Asynchrone Interrupts** (minimale Zwischenankunftszeit)

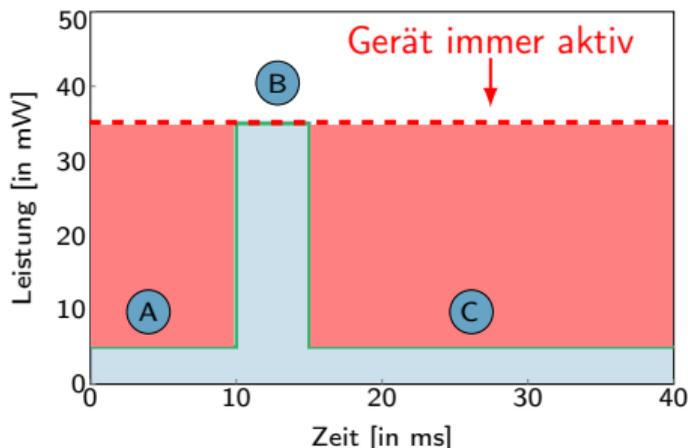
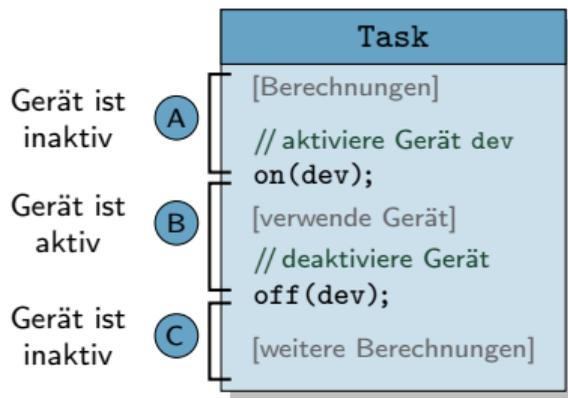
Geräte & Zustände

- Verschiedene **Geräte** (Sensoren, Aktoren, Transceiver)
- **Softwaregesteuert** durch explizite Systemaufrufe



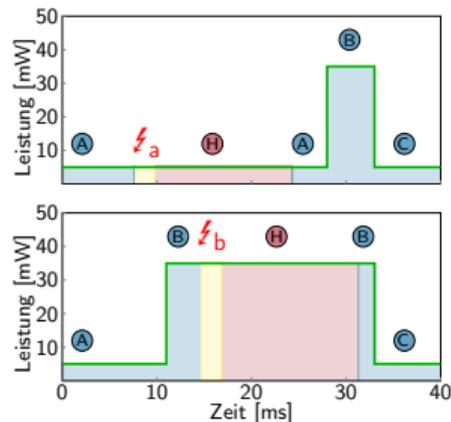
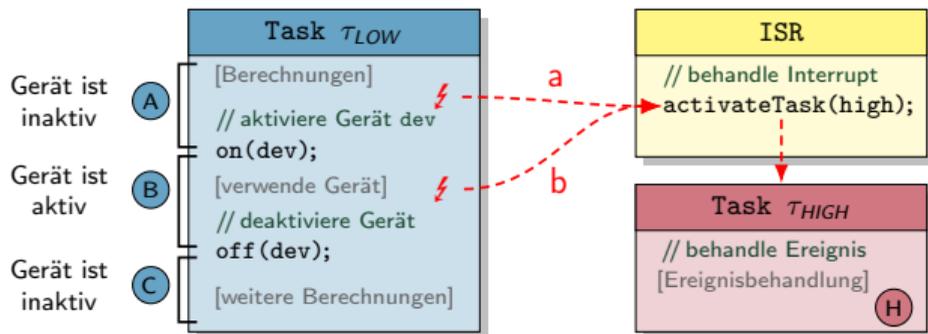


- Geräte bestimmen maßgeblich Leistungsaufnahme
- Strategie für **Energieeinsparungen**
 - **Aktiviere** Gerät für Verwendung
 - **Deaktiviere** Gerät nach Verwendung



- Geräte bestimmen maßgeblich Leistungsaufnahme
- Strategie für **Energieeinsparungen**
 - **Aktiviere** Gerät für Verwendung
 - **Deaktiviere** Gerät nach Verwendung

Grobgranulare Modellierung: **Unterabschätzungen** oder **pessimistische Schranken**



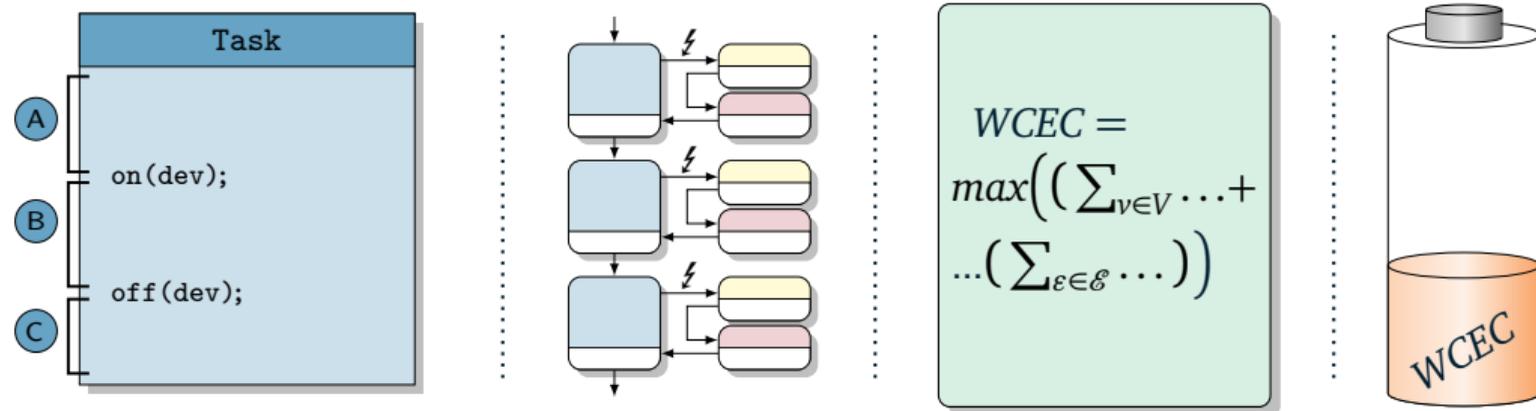
■ WCET-Analyse

- Task τ_{HIGH} beeinflusst WCET von Task τ_{LOW}

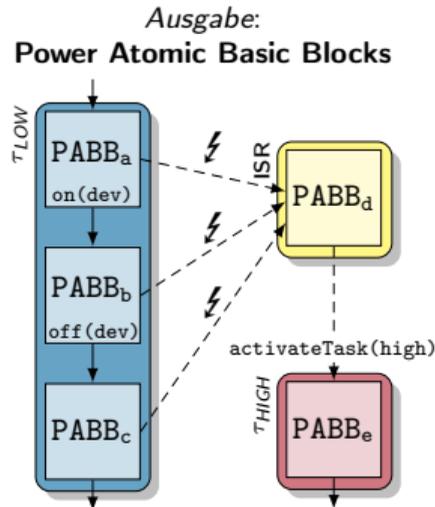
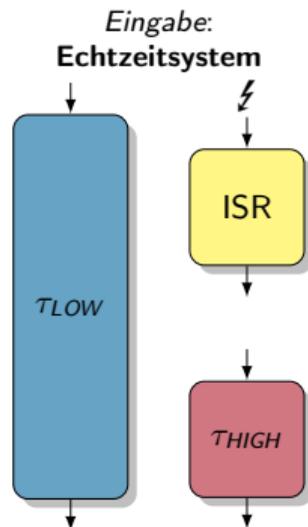
■ WCEC-Analyse

- Task τ_{HIGH} beeinflusst WCEC von Task τ_{LOW}
- Task τ_{LOW} beeinflusst WCEC von Task τ_{HIGH}

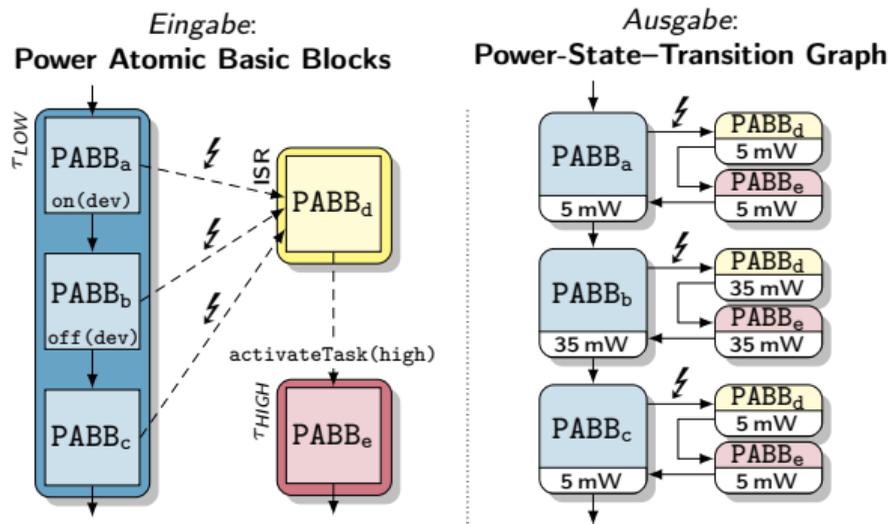
Wechselseitige Beeinflussung bei WCEC-Analyse



1. **Dekomposition:** Blöcke mit gleicher Leistungsaufnahme
2. **Pfadanalyse:** kontextsensitive Programmpfade
3. **Problemformulierung:** Integer Linear Program (ILP)
4. **Lösung:** ILP \rightsquigarrow systemweiter WCEC



- **Atomic Basic Block (ABB)**
 - Systemaufruf: ABB-Terminator
 - *Atomar* aus Sicht der Ablaufplanung
- **Power Atomic Basic Block (PABB)**
 - **Gerätebezogener Aufruf:** weiterer Terminator
 - **Leistungswahre Analyse**

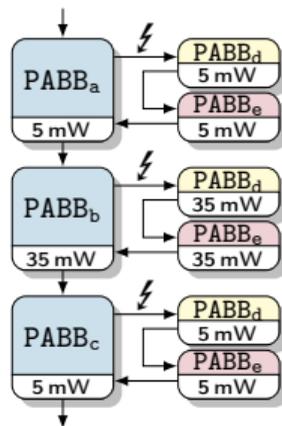


- *Transformation:*

- **Explizite Aufzählung** der möglichen Systempfade
 - **Zustände** propagieren entlang der Pfade

- *Ausgabe:*

- Graph mit Leistungszuständen: **Power-State-Transition Graph**
 - ☞ **Kontextsensitive Pfade: Geräte & Betriebssystem**



// Nebenbedingungen:

$$PABB_{a,5} = PABB_{d,5} + PABB_{b,35}$$

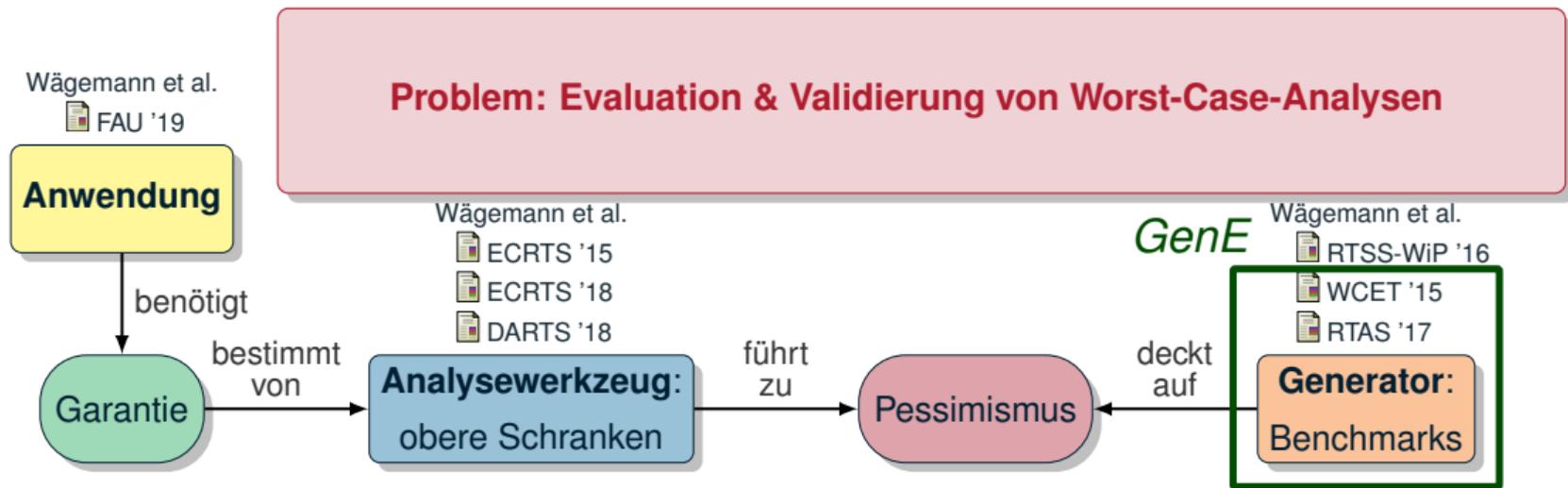
...

// Zielfunktion:

$$\max\left(\sum WCEC_{\vartheta} \cdot f_{\vartheta}\right)$$

- Nebenbedingung: Pfade aus Zustandsgraph
- Zielfunktion: Maximierung Energiebedarf \rightsquigarrow **sichere WCEC-Schranke** der Aufgabe
- Zusammenspiel aus WCEC- & WCET-Analyse
 1. Beschränkung der Anzahl der möglichen Interrupts
 2. Kosten von Knoten: $WCEC = P_{max} \cdot WCET$

WCET-Analyse pessimismus unbekannt



GenE: A Benchmark Generator for WCET Analysis

Workshop on Worst-Case Execution Time Analysis (**WCET '15**)

Benchmark Generation for Timing Analysis

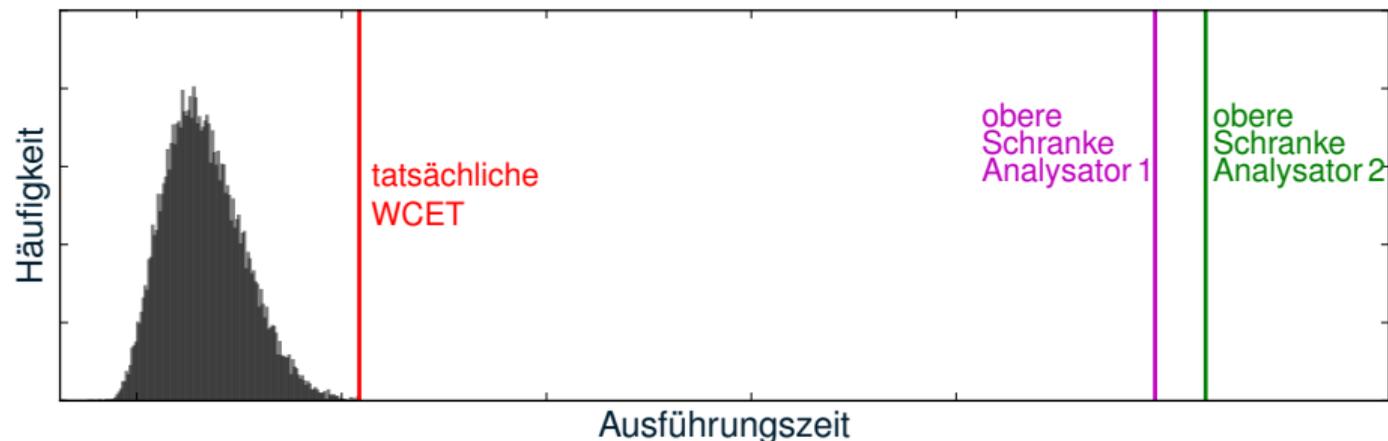
Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (**RTAS '17**)

```
const size_t N = 1024;
int32_t values[N];

TASK( $\tau_{\text{sort}}$ ){
    ...
    for(i = 0; i < N-1; i++){
        for(j = 0; j < N-1-i; j++){
            if(compare(values[j], values[j+1]))
                swap(&values[j], &values[j+1]);
        }
    }
}
```

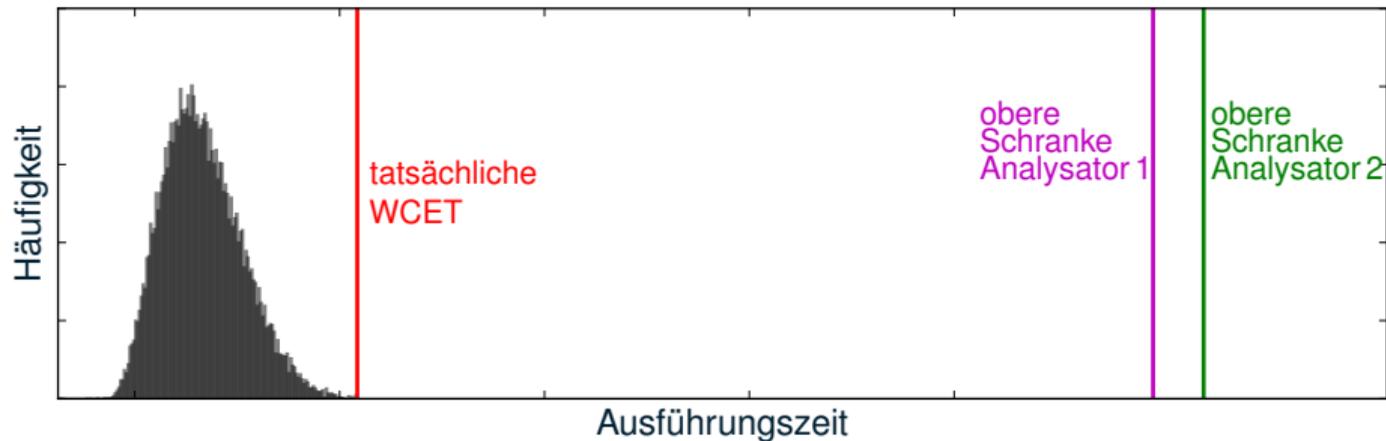
- Verschachtelte Schleifen
- Eingabeabhängige Pfade
- Hardware-Modellierung





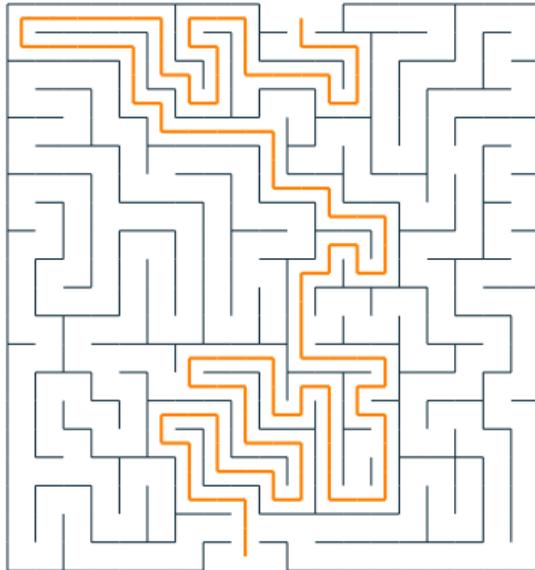
- Bestimmung Genauigkeit der Analyse: **tatsächlicher Worst-Case** essenziell
- **Existierende Benchmarks**
 1. Monolithische Struktur
 2. Automatische Extraktion aller Programmfakten unmöglich

👉 **Evaluation & Validierung:** Wissen über Programmfakten notwendig

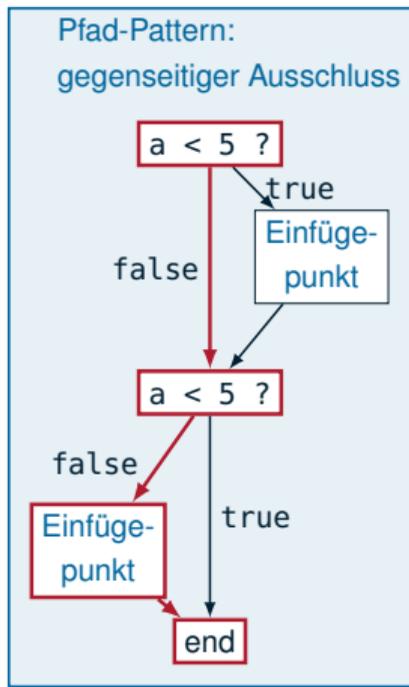


Wie lässt sich die tatsächliche WCET ermitteln?

- ☞ *GenE*: generiert Benchmarks, deren Programmfakten bekannt sind

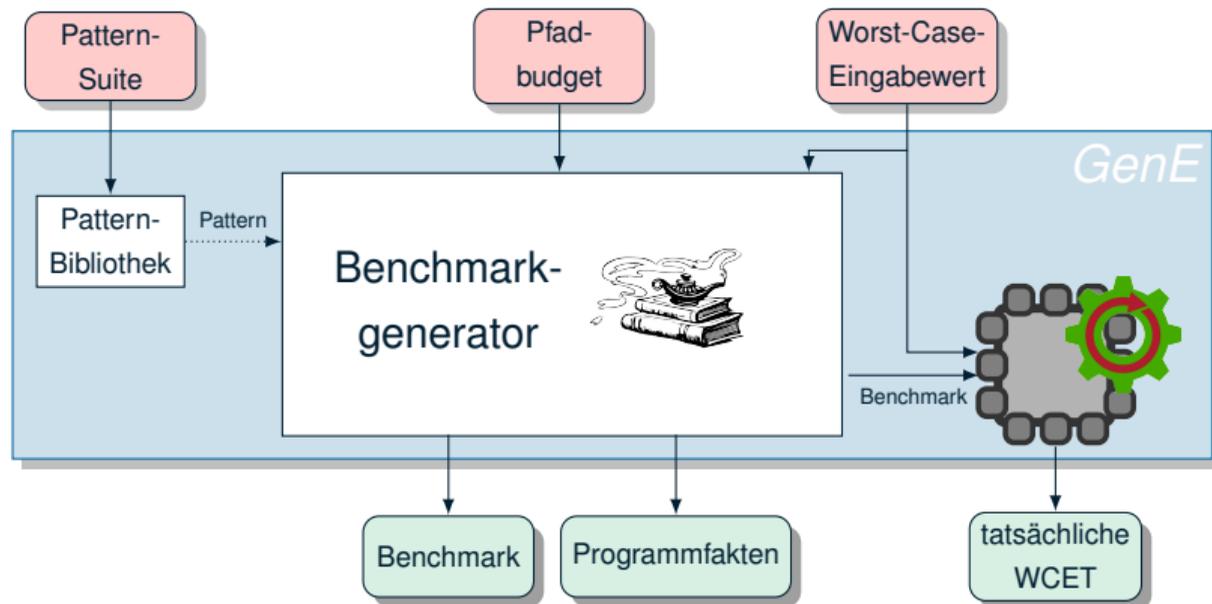


👉 Generativer Ansatz: **Worst-Case-Pfad** bekannt



Pattern

- **Enthalten Programmfakten**
- **Kombinierbar**: ineinander verwoben
- Pfad-Pattern, Schleifen, arithmetische Operationen, Variablen, Funktionsaufrufe, ...
- **Realistisch & herausfordernd**
 - Industrie-Anwendungen
 - Literatur
- **Pattern-Suites** verhindern monolithische Benchmarks



Evaluation der WCET-Analysatoren Platin & aiT

- WCET-Analysatoren: Platin & aiT
- Hardware: ARM Cortex-M4 (Infineon XMC4500)
- 10 000 Benchmarks, verschiedene Pattern
- Optimum: 0% Überabschätzung



Platin

Instruktionscache

- **Deaktiviert: 96%**
- **Aktiviert: –**

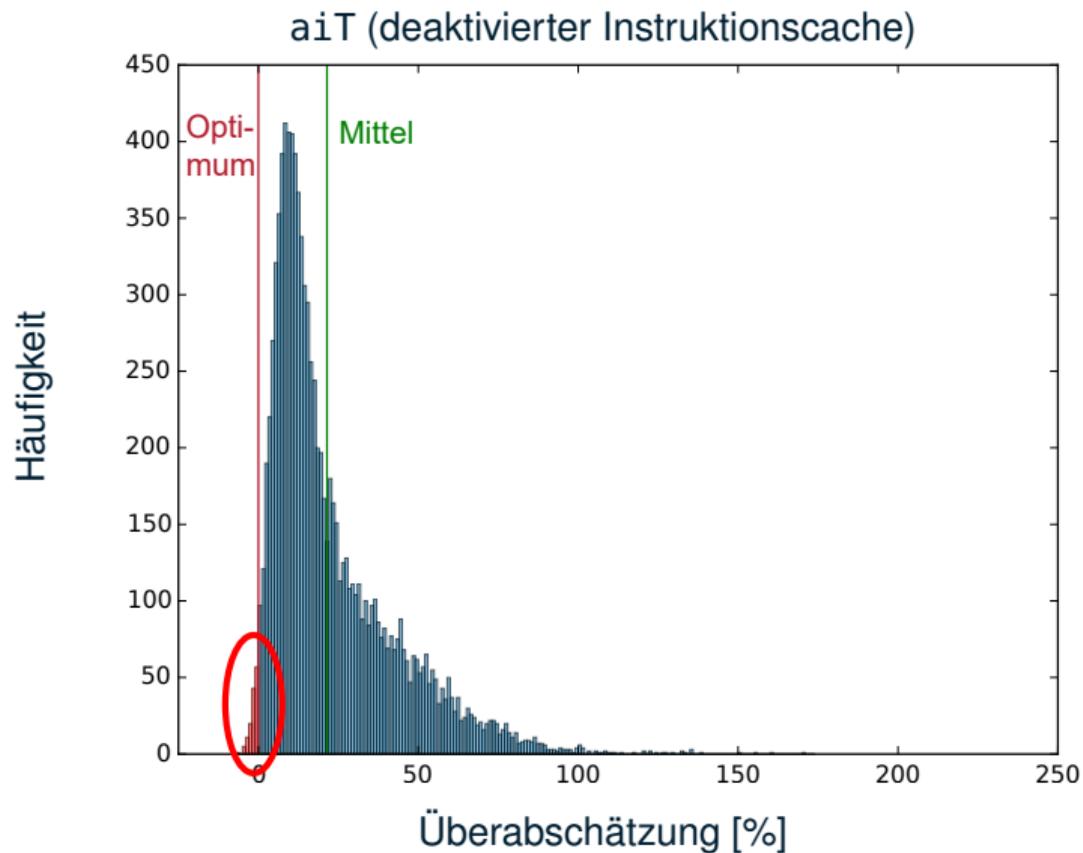


aiT

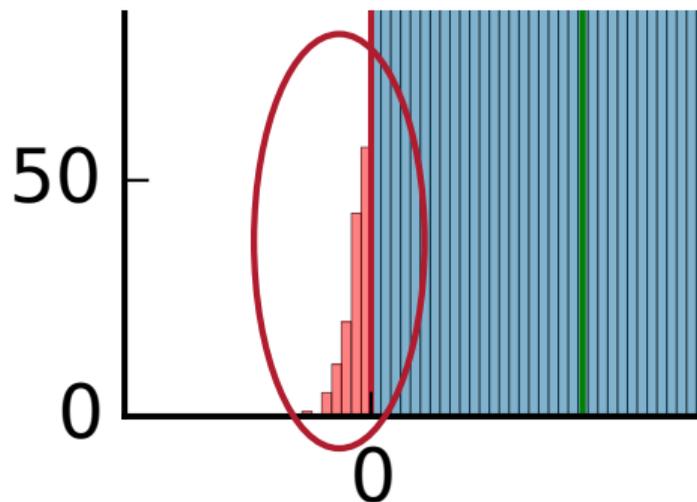
Instruktionscache

- **Deaktiviert: 23%**
- **Aktiviert: 36%**





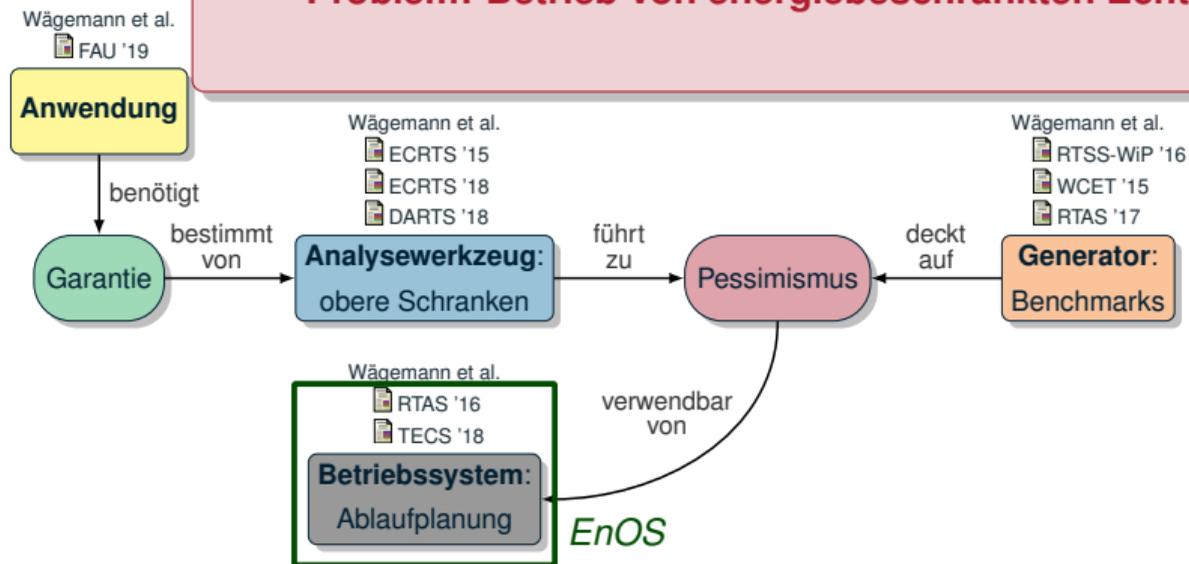
Evaluation: Bugs in WCET-Analysator aiT



- Beobachtung: **Unterabschätzungen** der tatsächlichen WCET
- *AbsInt*: **Fehler in WCET-Analysator** entdeckt durch Benchmarks von *GenE*
 1. Pipeline-Modell: spekulative Sprungvorhersage
 2. Speicher-Modell: fehlerhafte Zugriffsdauer

✓ *GenE*: Bestimmung Genauigkeit & **Unterabschätzungen aufgedeckt**

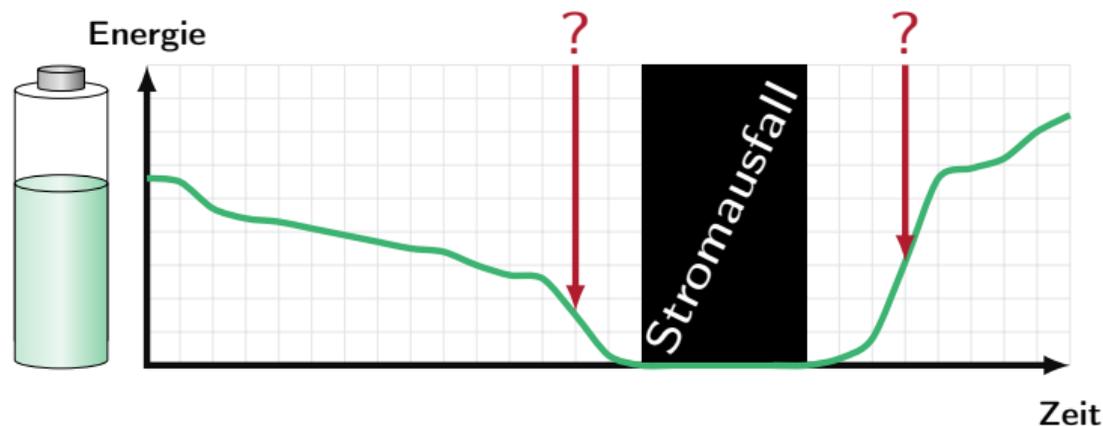
Problem: Betrieb von energiebeschränkten Echtzeitsystemen



A Kernel for Energy-Neutral Real-Time Systems with Mixed Criticalities
Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (**RTAS '16**)

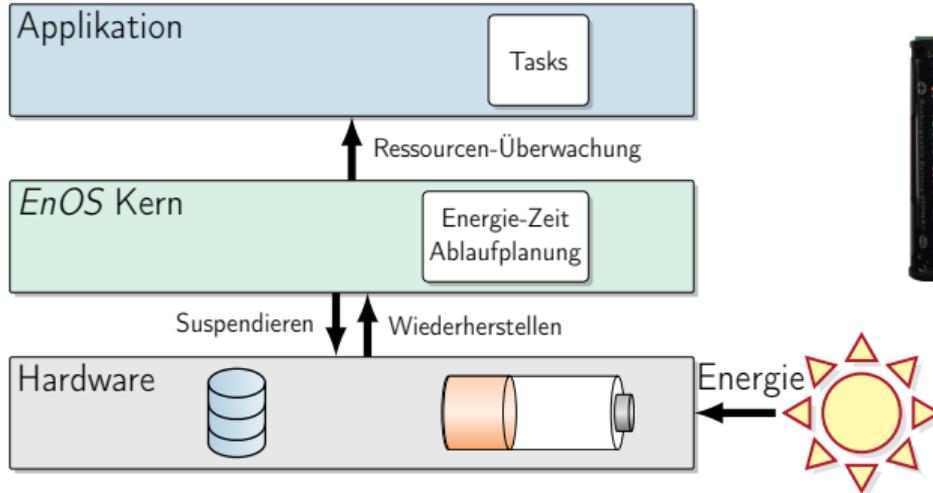
Operating Energy-Neutral Real-Time Systems

Transactions on Embedded Computing Systems (**TECS '18**)



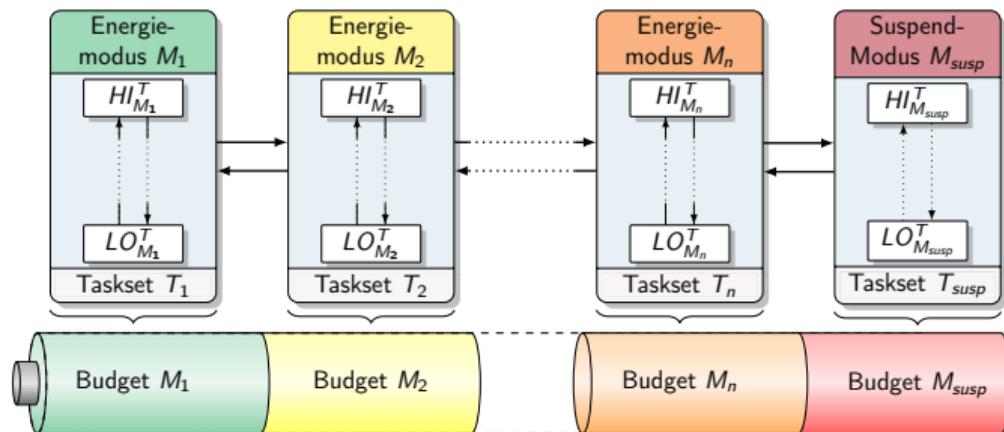
Teilprobleme

1. **Hoher Pessimismus** \rightsquigarrow ungenutzte Ressourcen
2. **Ablaufplanung**: Garantien unter beschränkten Ressourcen Zeit & Energie
3. **Energie-Harvesting-Systeme**: unregelmäßige Energiezufuhr & Stromausfälle



Hardware

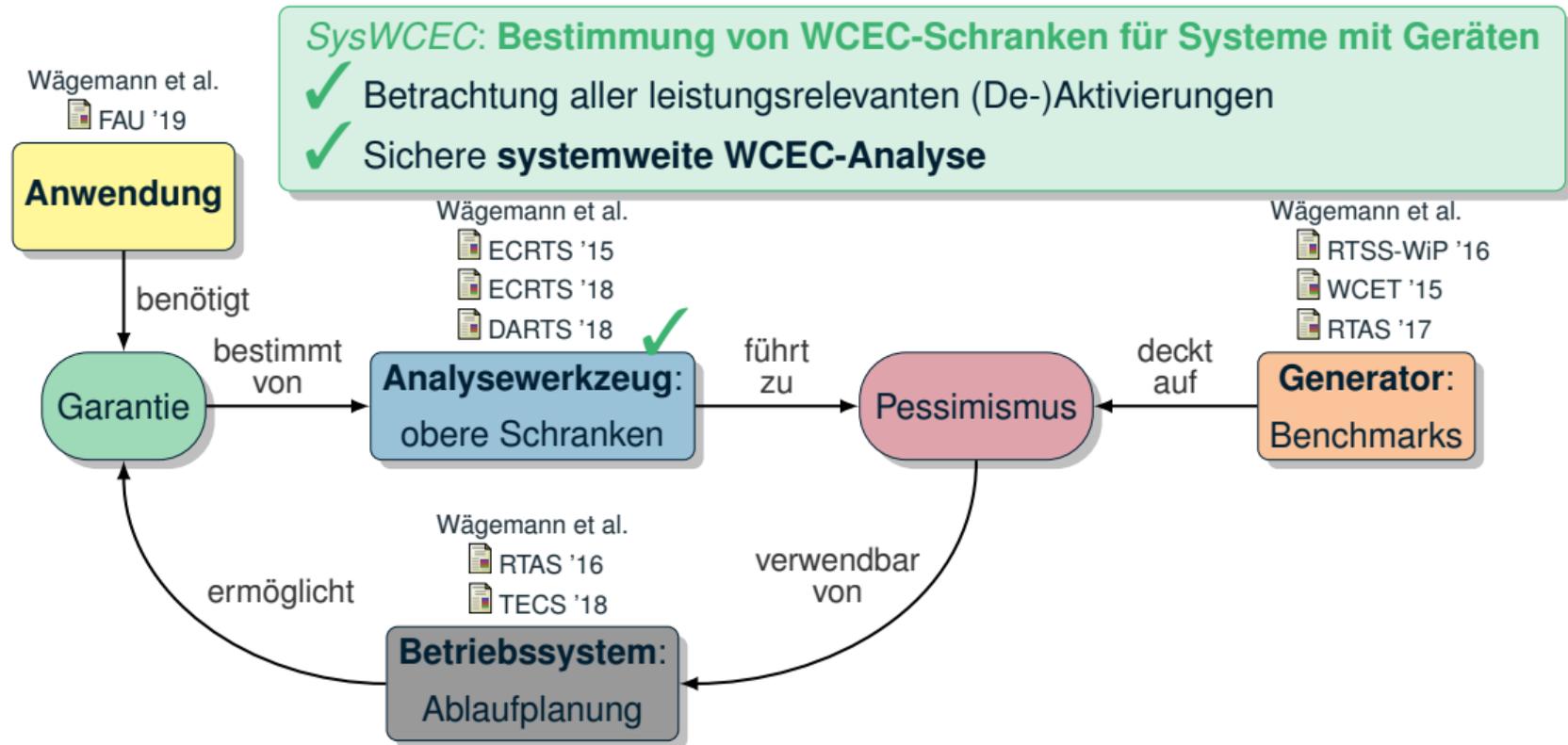
- **Überwachung des Ressourcenverbrauchs:** Interrupts für Ressourcenbudgets
- **Persistenz:** nicht-flüchtiger Speicher

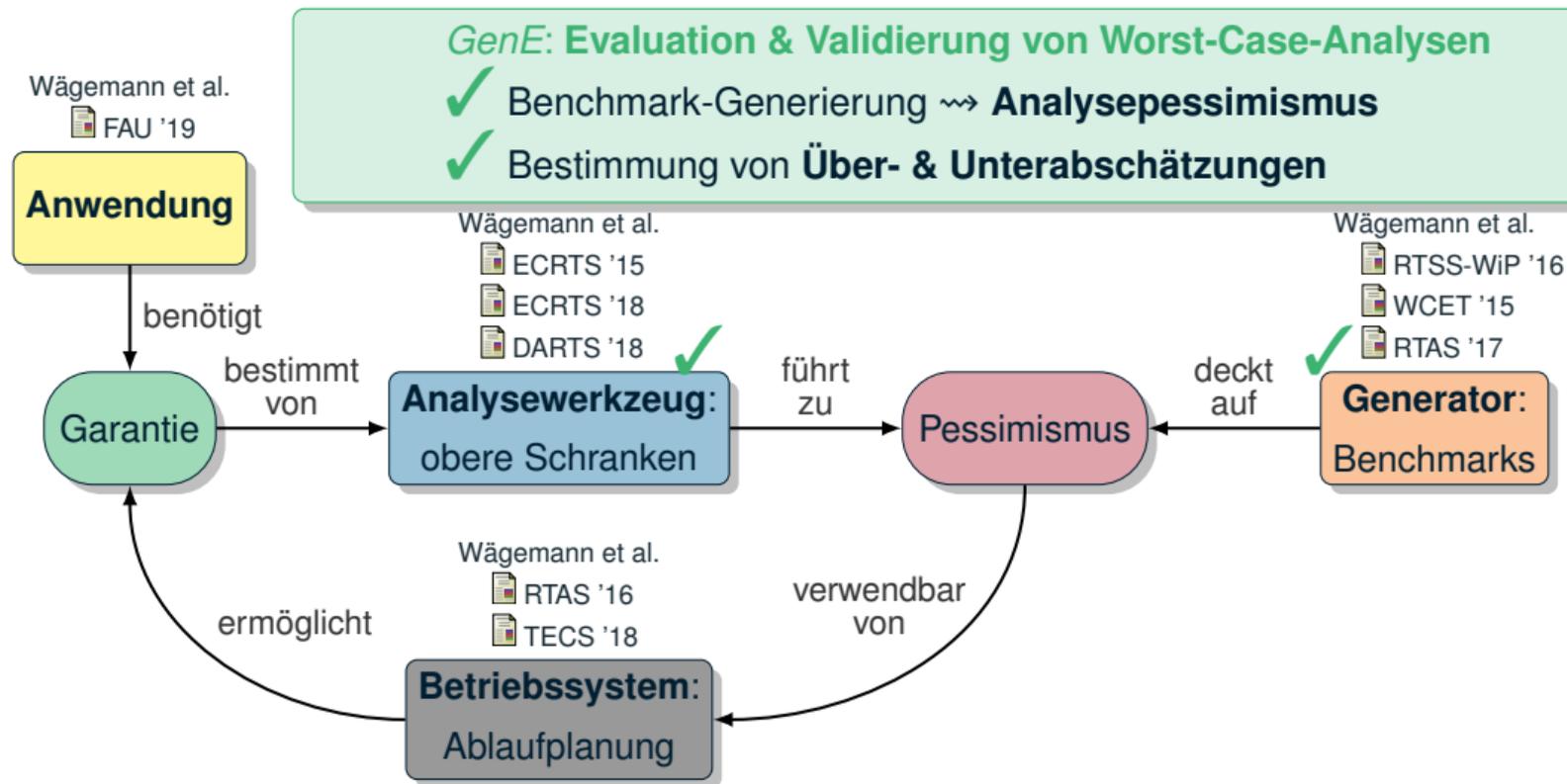


Software

- Offline: Budgets für **Betriebsmodi** basierend auf WCET-/WCEC-Abschätzungen
- Online: Ausführung der Betriebsmodi je nach Ressourcenverfügbarkeit
 - **Optimistische Worst-Case-Abschätzungen** mildern Analysepessimismus
 - **Überwachung** des Ressourcenverbrauchs

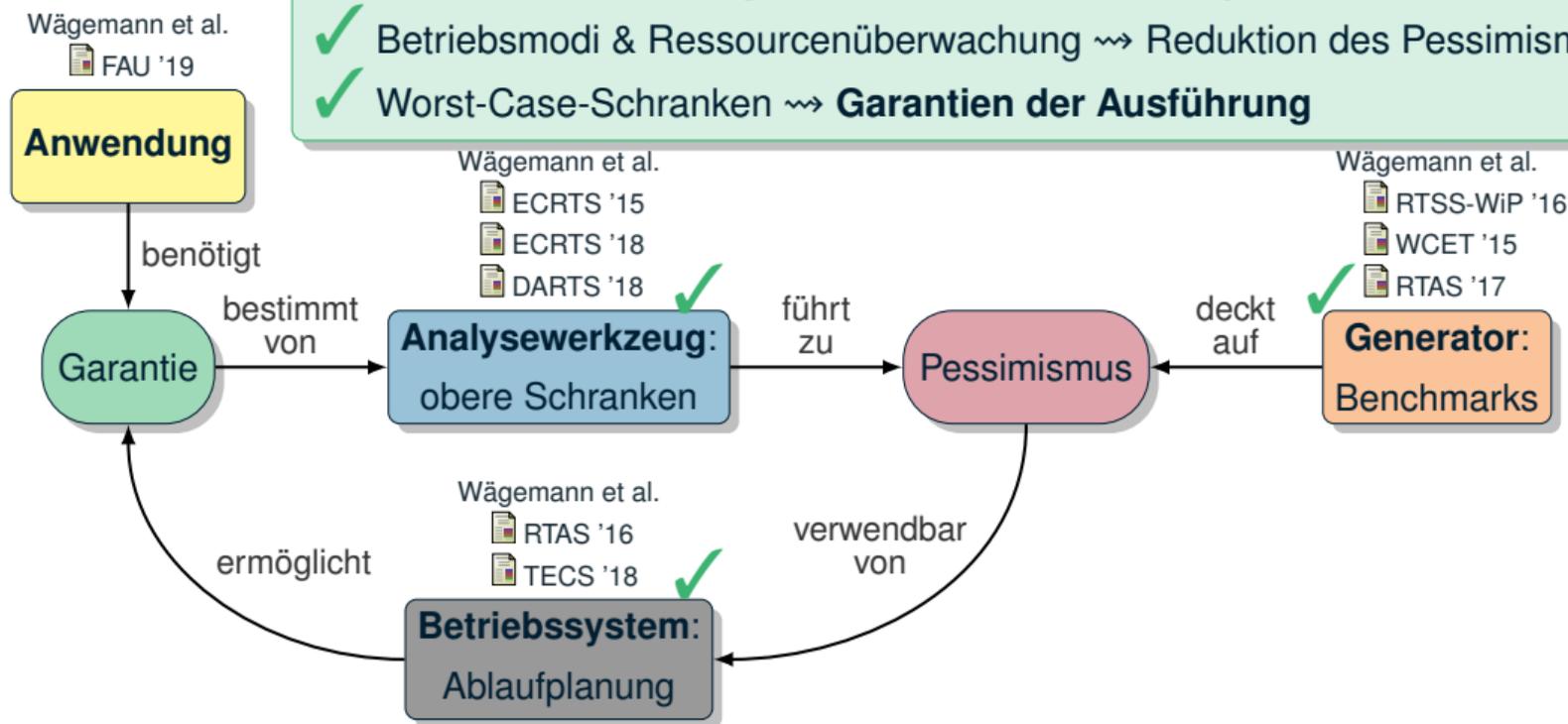
✓ **Vorausschauende Ablaufplanung ermöglicht Garantien**





EnOS: Betrieb von energiebeschränkten Echtzeitsystemen

- ✓ Betriebsmodi & Ressourcenüberwachung \rightsquigarrow Reduktion des Pessimismus
- ✓ Worst-Case-Schranken \rightsquigarrow **Garantien der Ausführung**



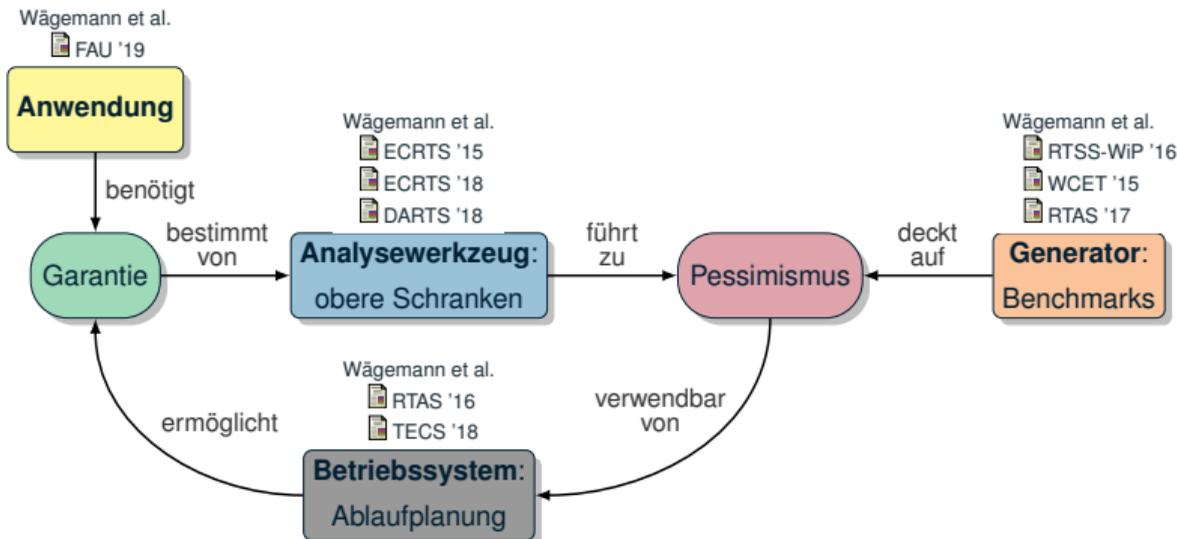
Vielen Dank für die Aufmerksamkeit! Fragen?

Quellcode

<https://gitlab.cs.fau.de/syswcec>

<https://gitlab.cs.fau.de/gene>

<https://gitlab.cs.fau.de/enos>



- Fledermäuse (fliegend): Sherri and Brock Fenton
- Fledermaus (in Hand): Linus Günther
- Mobiler Knoten (BATS): Simon Ripperger
- Herzschrittmacher: Medtronic Micra
- Energie-Harvesting Herzschrittmacher: University of Illinois at Urbana-Champaign
- Airbus: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/48/Airbus_A380_overfly_crop.jpg