

Entwurf und Implementierung eines energieneutralen Echtzeit-Betriebssystems

Phillip Raffeck



Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Workshop Echtzeit 2016: Internet der Dinge

17. November 2016

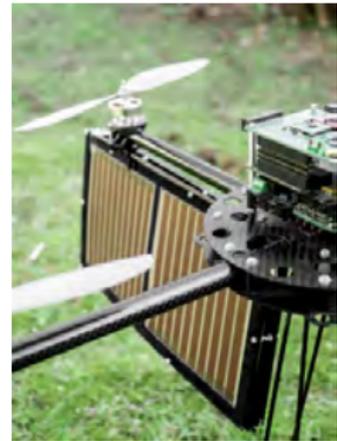




Energieneutraler Echtzeitsysteme

- Energiegewinnung aus der Umgebung
 - Speicherung gewonnener Energie
 - Wiedergewinnung sämtlicher verbrauchter Energie
- ⇒ Missionsdauer nicht durch Energieverbrauch beschränkt





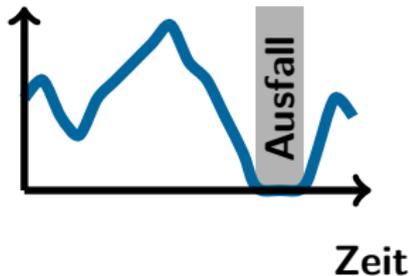
Prototyp: Energieneutraler Quadrokopter

- Energiegewinnung mittels einklappbarer Solarpanelen
- Einsatzszenario: autonomes Sammeln von Messdaten
- Echtzeitanforderungen für Flugsteuerung

Ulbrich et al. *I4Copter: An Adaptable and Modular Quadrotor Platform*, SAC'11

Probleme energieneutraler Echtzeitsysteme

Verfügbare
Energie



Probleme der Energieversorgung

- schwankende verfügbare Energie
- energielose Schlafphasen möglich
- ☞ **energieabhängiges Verhalten**

Herausforderungen energieloser Schlafphasen

- Versetzen des Systems in **sicheren Zustand**
- **konsistente** Verwahrung des Systemzustands
- Wiederaufnahme des Betriebs zu **sinnvollem Zeitpunkt**

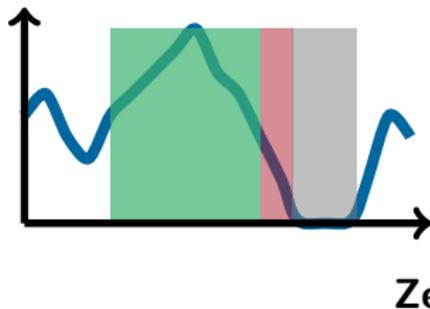


Probleme energieneutraler Echtzeitsysteme

Energieabhängiges Verhalten

Status	Verhalten	Zeit	Energie
reichlich Energie	Aktivitätsphase	!!!	!
abnehmende Energie	garantierte Landung	!!!	!!
System stationär	Schlafphase	!	!!!

Verfügbare
Energie



Zeit- und Energiebeschränkungen

- ☞ unterschiedlich kritisch
- ☞ in unterschiedlichen Phasen



Herausforderungen

1. Scheduling unter Berücksichtigung von Energie und Zeit
2. Präzise Bestimmung der verfügbaren Energie zur Laufzeit
3. Strategie zur Behandlung von Schlafphasen

The logo for ENOS features the letters 'E', 'n', 'O', and 'S' in a bold, black, sans-serif font. The letter 'O' is stylized as a circle containing several small black butterfly silhouettes. Additional butterfly silhouettes are scattered above the 'O' and around the 'n'.

1. Motivation
2. Scheduling unter Berücksichtigung von Energie und Zeit
3. Präzise Bestimmung der verfügbaren Energie zur Laufzeit
4. Strategie zur Behandlung von Schlafphasen
5. Evaluation
6. Fazit



1. Motivation
2. Scheduling unter Berücksichtigung von Energie und Zeit
3. Präzise Bestimmung der verfügbaren Energie zur Laufzeit
4. Strategie zur Behandlung von Schlafphasen
5. Evaluation
6. Fazit



Scheduling mit gemischten Kritikalitäten

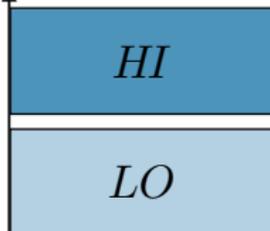


Flugsteuerung



Datenerhebung

Zeit



Ansatz von Vestal

☞ **unterschiedlich kritische** Aufgaben

Gemischte Kritikalitäten nach Vestal

- Aufteilen der Aufgaben nach Kritikalität
- harte Echtzeitgarantien für kritische Aufgaben
- kritischere Aufgabe \rightsquigarrow pessimistischere WCET-Abschätzung
 \rightsquigarrow garantierte Termineinhaltung
- Umverteilung von Ressourcen zu kritischeren Leveln



Scheduling mit gemischten Kritikalitäten

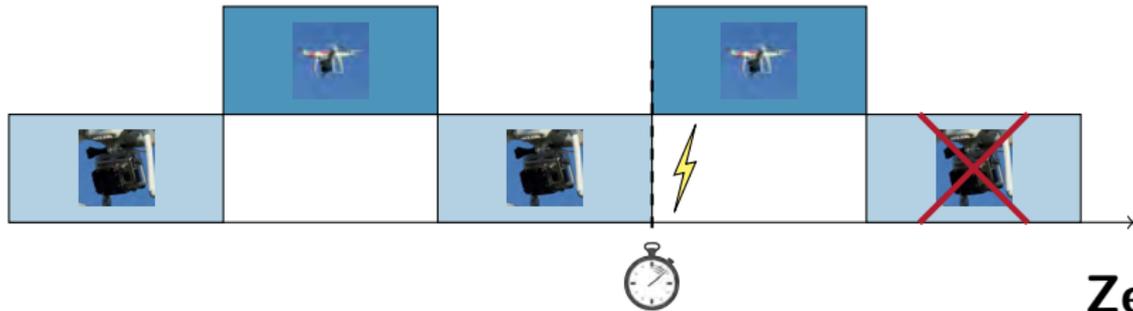
Vorgehen zur Laufzeit

- kritischere Aufgabe \rightsquigarrow pessimistischere WCET-Abschätzung
- \Rightarrow unkritische Level eventuell **zu optimistisch**
- \Rightarrow WCET-Überwachung zur Laufzeit

Vorgehen bei WCET-Verletzungen

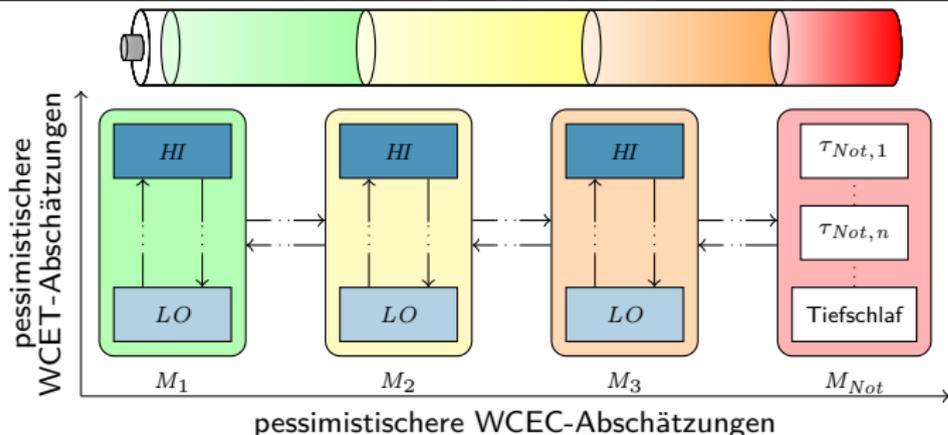
- Erhöhen des Systemkritikalitätslevels
- Verdrängen unkritischer Aufgaben

Systemlevel: *HI*



Zeit

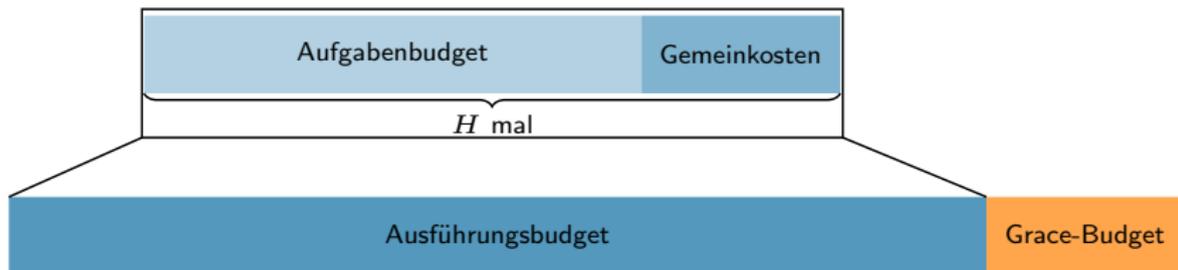
Energiemodusmodell



Scheduling im Energiemodusmodell

- höherer Modus \rightsquigarrow pessimistischere WCEC-Abschätzungen
 - Aufgabenset mit gemischten Kritikalitäten (Zeit) pro Modus
- ⇒ Scheduling berücksichtigt **Energie und Zeit**
- **unterschiedliche Funktionalität** pro Modus
- ⇒ volle Funktionalität bei reichlich verfügbarer Energie





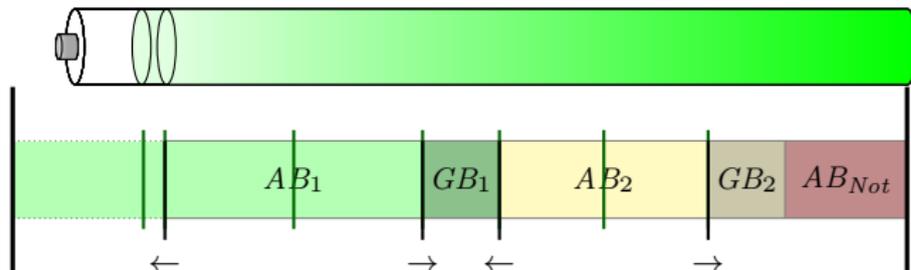
Budgetzusammensetzung

- **Ausführungsbudget:** Genauigkeit abhängig von Energiemodus
 - Ausführung auf diesem Modus für mindestens H Hyperperioden
- **Grace-Budget:** garantiertes Beenden der Hyperperiode
 - physikalische Obergrenze des Energieverbrauchs
 - abhängig von Hyperperiodenlänge
 - Bruchteil des Ausführungsbudgets



Scheduling zur Laufzeit

- prioritätsbasiertes, preemptives Scheduling
- Moduswechsel je nach aktuell verfügbarer Energie

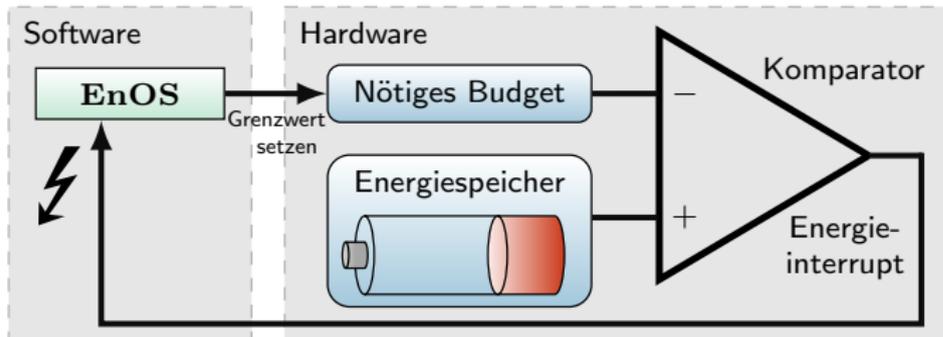


AB: Ausführungsbudget

GB: Grace-Budget

1. Motivation
2. Scheduling unter Berücksichtigung von Energie und Zeit
- 3. Präzise Bestimmung der verfügbaren Energie zur Laufzeit**
4. Strategie zur Behandlung von Schlafphasen
5. Evaluation
6. Fazit





Energieinterrupts – Leichtgewichtiger Signalmechanismus

- Benachrichtigungen beim Erreichen bestimmter Energiewerte
- Aufsetzen eines Interrupts bei entsprechenden Budgets
 - ☞ Einleiten eines **Modusabstiegs**
 - ☞ Einleiten des **Aufwachens**

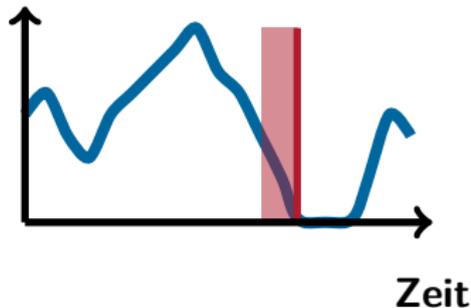


1. Motivation
2. Scheduling unter Berücksichtigung von Energie und Zeit
3. Präzise Bestimmung der verfügbaren Energie zur Laufzeit
- 4. Strategie zur Behandlung von Schlafphasen**
5. Evaluation
6. Fazit



Überstehen von Ausfällen

Verfügbare Energie



Probleme

- plötzliches Abschalten
- ☞ unsicherer Zustand
- ☞ mögliche Datenkorruption

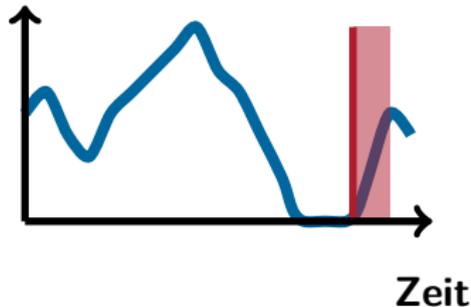
Kontrolliertes Abschalten

- frühzeitiges Erkennen
 - ✓ Vorabwissen über Budgets
 - ✓ Energieinterrupts
- Garantie für konsistenten Zustand
 - ☞ Sichern des flüchtigen Systemzustands
- ☞ Übergang in Schlafphase



Überstehen von Ausfällen

Verfügbare
Energie



Probleme

- Start mit zu geringer Energie
- ☞ plötzlicher Ausfall
- ☞ mögliche Datenkorruption

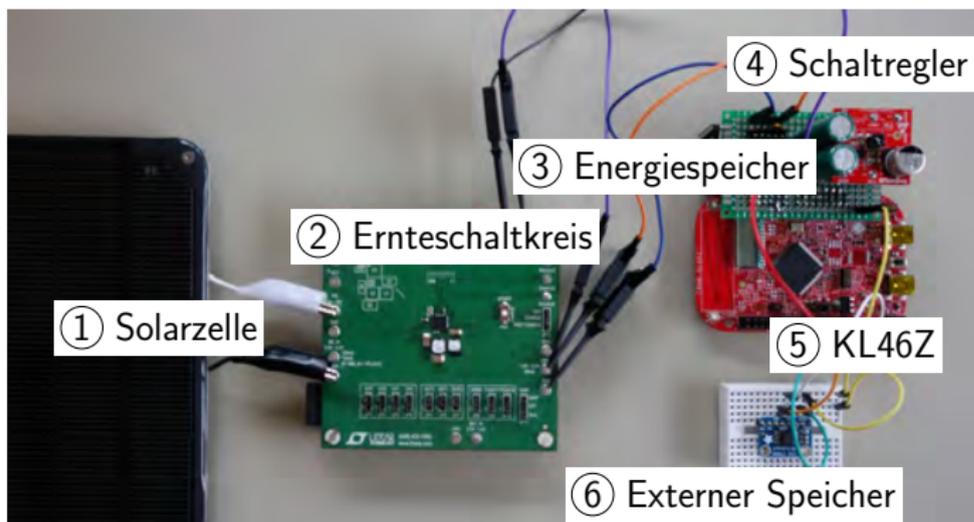
Kontrolliertes Beenden der Schlafphase

- frühzeitiges Aufwachen vermeiden
 - ☞ ausreichend Energie für sinnvolle Arbeit
- **sinnvolle Arbeit** ⇔ Entwickler gibt Aufwachmodus vor
- **ausreichend Energie** ⇔ Energieinterrupt als Aufwachsignal



1. Motivation
2. Scheduling unter Berücksichtigung von Energie und Zeit
3. Präzise Bestimmung der verfügbaren Energie zur Laufzeit
4. Strategie zur Behandlung von Schlafphasen
- 5. Evaluation**
6. Fazit

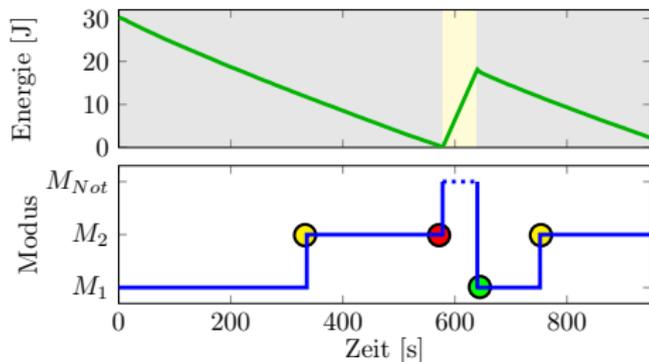




Konkreter Versuchsaufbau

- NXP FRDM KL46Z
- Energieernte via Solarzelle
- Energiespeicherung mittels Superkondensator

Genauigkeit der Moduswechsel



Moduswechsel	Berechnet [mJ]	Gemessen [mJ]
$M_1 \rightarrow M_2$	12252	12218
$M_2 \rightarrow M_{Not}$	87	65
$M_{Not} \rightarrow M_1$	17640	18122
$M_1 \rightarrow M_2$	12252	12218

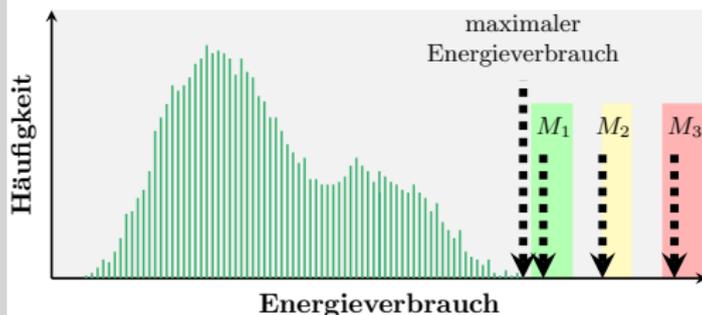
Genauigkeit der Moduswechsel

- Moduswechsel passend zu Energieverlauf
- Abweichungen von 0,3 % – 3 % (25,3 % bei sehr niedriger Energie)
- sämtliche Abweichungen kleiner als Grace-Budget (82 mJ)

👉 **rechtzeitige Reaktion**



Genauigkeit der ermittelten Budgets



M_3	6.83
M_2	6.04
M_1	5.39
Messung	5.17

Hyperperiodenbudgets [in mJ]

Optimistische Budgetabschätzungen

- **keine Unterapproximationen**
- Überapproximationen von 4,3 % – 32,1 %
- Ausnutzung optimistischer Budgets
- ☞ längeres Verweilen auf niedrigeren Modi
- ☞ **längerer Normalbetrieb** bei voller Funktionalität



1. Motivation
2. Scheduling unter Berücksichtigung von Energie und Zeit
3. Präzise Bestimmung der verfügbaren Energie zur Laufzeit
4. Strategie zur Behandlung von Schlafphasen
5. Evaluation
6. Fazit



Scheduling unter Berücksichtigung von Energie und Zeit

✓ Energiemodusmodel

☞ unnötigen **Pessimismus vermieden**

Präzise Bestimmung der verfügbaren Energie zur Laufzeit

✓ Energieinterrupts

Strategie zur Behandlung von Schlafphasen

✓ **kontrolliertes** Schlafenlegen und Aufwachen



Quellcode verfügbar

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



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!
Fragen?

The logo for EnOS, featuring the letters "EnOS" in a bold, black, sans-serif font. The letter "O" is replaced by a circle containing several small black silhouettes of butterflies.



Wägemann, Distler, Janker, Raffeck, Sieh.

A Kernel for Energy-Neutral Real-Time Systems with Mixed Criticalities.

2016 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)

