

# DIY – Individual Prototyping and Systems Engineering

## Grundlagen und Terminologie

**Peter Wägemann**

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

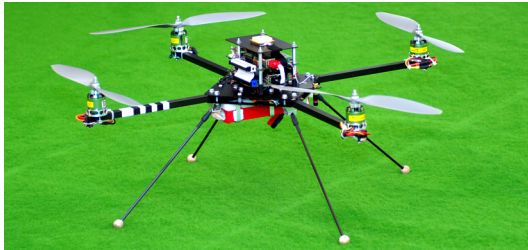
<https://www4.cs.fau.de>

23. April 2018



# Aufbau des Demonstrators

Eine elementare Kontrollschleife: Die Flugregelung

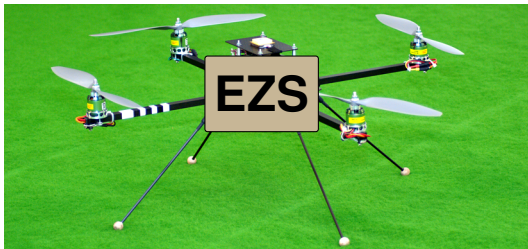


Quadrocopter sind **inhärent instabil**  $\leadsto$  ständige, aktive Kontrolle



# Aufbau des Demonstrators

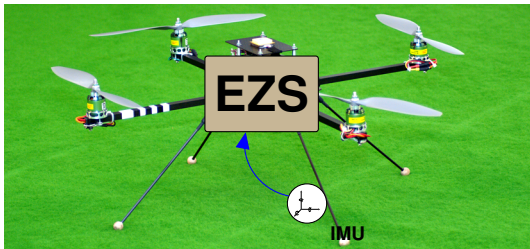
Eine elementare Kontrollschleife: Die Fluglageregelung



Quadrokopter sind **inhärent instabil**  $\leadsto$  ständige, aktive Kontrolle

- Aufgabe des Echtzeitsystems: **Fluglageregelung** (Stabilisierung)

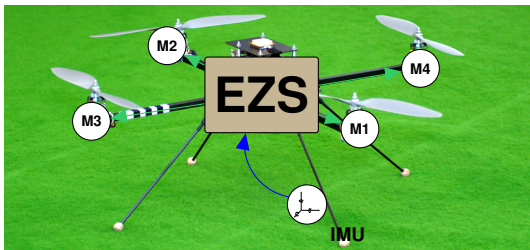




Quadrokopter sind **inhärent instabil**  $\leadsto$  ständige, aktive Kontrolle

- **Aufgabe** des Echtzeitsystems: **Fluglageregelung** (Stabilisierung)
  - Bewegung im Raum bestimmen (engl. *inertial measurement unit*)





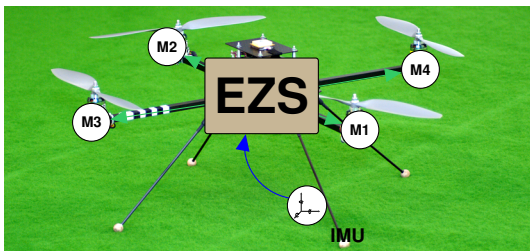
Quadrokopter sind **inhärent instabil**  $\leadsto$  ständige, aktive Kontrolle

- **Aufgabe** des Echtzeitsystems: **Fluglageregelung** (Stabilisierung)
  - Bewegung im Raum bestimmen (engl. *inertial measurement unit*)
  - Vorgabe der Motor- und damit der Rotordrehzahl



# Aufbau des Demonstrators

Eine elementare Kontrollschleife: Die Flugregelung



Quadrokopter sind **inhärent instabil**  $\leadsto$  ständige, aktive Kontrolle

- **Aufgabe** des Echtzeitsystems: **Fluglageregelung** (Stabilisierung)
  - Bewegung im Raum bestimmen (engl. *inertial measurement unit*)
  - Vorgabe der Motor- und damit der Rotordrehzahl



Physikalisches **Objekt**, Echtzeit-**Anwendung** und -**Rechensystem**



- Lage im Raum wird durch Änderung der Rotordrehzahl des Quadropters beeinflusst, bis Gleichgewicht zwischen Ist- und Sollzustand



- Lage im Raum wird durch Änderung der Rotordrehzahl des Quadropters beeinflusst, bis Gleichgewicht zwischen Ist- und Sollzustand



Wie lange dauert es bis zum Gleichgewicht?

- Gewicht, Leistungsfähigkeit der Motoren, Bauart der Rotorblätter, ...  
→ Objektdynamik und -physik



- Lage im Raum wird durch **Änderung der Rotordrehzahl** des Quadropters beeinflusst, bis **Gleichgewicht** zwischen Ist- und Sollzustand



**Wie lange dauert es** bis zum Gleichgewicht?

- Gewicht, Leistungsfähigkeit der Motoren, Bauart der Rotorblätter, ...
- **Objektdynamik** und **-physik**



Dies ist die Welt der **Steuerungs-** und **Regelungsanwendungen**

- Regelungstechnische Abstraktion des Quadropters:  
**Dynamisches System** welches **Eingangs-** in **Ausgangssignale** überführt
  - Ziel ist die mathematische Beschreibung des Systemverhaltens mittels einer **Übertragungsfunktion** (engl. *transfer function*)
- Reaktion kann errechnet und gezielt beeinflusst werden





Operateur



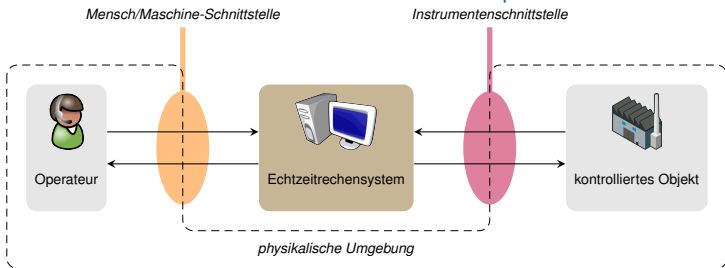
Echtzeitrechnungssystem



kontrolliertes Objekt

# Kopplung mit der (realen) Umwelt

## Komponenten eines Echtzeitsystems

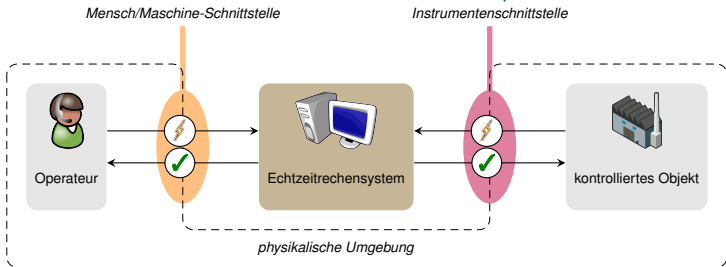


- Echtzeitrechnungssystem interagiert mit der **physikalischen Umwelt**



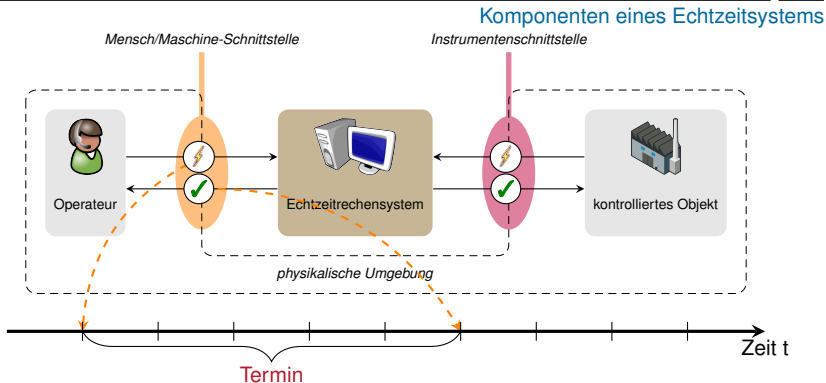
# Kopplung mit der (realen) Umwelt

## Komponenten eines Echtzeitsystems



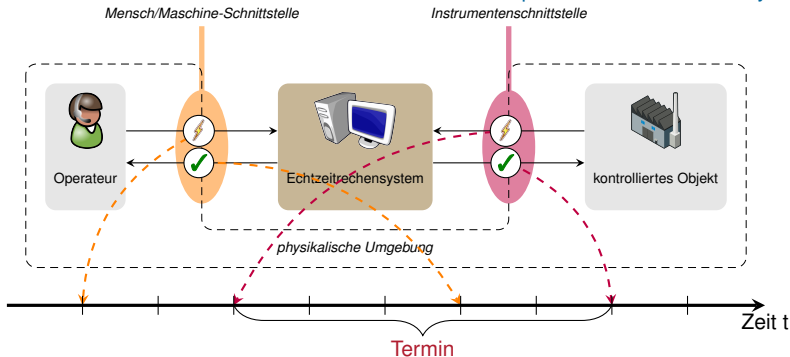
- Echtzeitrechnungssystem interagiert mit der **physikalischen Umwelt**
- Berechnet als Reaktion auf **Ereignisse** ⚡ (engl. *event*, Stimuli) der Umgebung **Ergebnisse** ✓ (engl. *result*)

# Kopplung mit der (realen) Umwelt



- Echtzeitrechnungssystem interagiert mit der **physikalischen Umwelt**
- Berechnet als Reaktion auf **Ereignisse** ⚡ (engl. *event*, Stimuli) der Umgebung **Ergebnisse** ✓ (engl. *result*)
- Zeitpunkt, zu dem ein Ergebnis vorliegen muss, wird als **Termin** oder **Frist** (engl. *deadline*) bezeichnet





- Echtzeitrechnungssystem interagiert mit der **physikalischen Umwelt**
- Berechnet als Reaktion auf **Ereignisse** ⚡ (engl. *event*, Stimuli) der Umgebung **Ergebnisse** ✅ (engl. *result*)
- Zeitpunkt, zu dem ein Ergebnis vorliegen muss, wird als **Termin** oder **Frist** (engl. *deadline*) bezeichnet



Echtzeitbetrieb bedeutet **Rechtzeitigkeit**

- Funktionale Korrektheit reicht für korrektes Systemverhalten nicht aus
- **Rechtzeitige** Bereitstellung der Ergebnisse ist **entscheidend**





Echtzeitbetrieb bedeutet **Rechtzeitigkeit**

- Funktionale Korrektheit reicht für korrektes Systemverhalten nicht aus
- **Rechtzeitige** Bereitstellung der Ergebnisse ist **entscheidend**
  
- Den Rahmen stecken der **Eintrittspunkt** des Ereignisses und der entsprechende **Termin** ab





Echtzeitbetrieb bedeutet **Rechtzeitigkeit**

- Funktionale Korrektheit reicht für korrektes Systemverhalten nicht aus
- **Rechtzeitige** Bereitstellung der Ergebnisse ist **entscheidend**

- Den Rahmen stecken der **Eintrittspunkt** des Ereignisses und der entsprechende **Termin** ab



Termine hängen dabei von der Anwendung ab

**wenige Mikrosekunden** z.B. Drehzahl- und Stromregelung bei der Ansteuerung von Elektromotoren

**einige Millisekunden** z.B. Multimedia-Anwendungen (Übertragung von Ton- und Video)

**Sekunden, Minuten, Stunden** z.B. Prozessanlagen (Erhitzen von Wasser)





**Geschwindigkeit ist keine Garantie** für die rechtzeitige Bereitstellung von Ergebnissen

- **Asynchrone Programmunterbrechungen** (engl. *interrupts*) können **unvorhersagbare Laufzeitvarianzen** verursachen
- Schnelle Programmausführung ist bestenfalls hinreichend für die rechtzeitige Bearbeitung einer Aufgabe





**Geschwindigkeit ist keine Garantie** für die rechtzeitige Bereitstellung von Ergebnissen

- **Asynchrone Programmunterbrechungen** (engl. *interrupts*) können **unvorhersagbare Laufzeitvarianzen** verursachen
- Schnelle Programmausführung ist bestenfalls hinreichend für die rechtzeitige Bearbeitung einer Aufgabe



**Zeit ist keine intrinsische Eigenschaft des Rechensystems**

- Die Zeitskala des Rechensystems muss nicht mit der durch die Umgebung vorgegebenen (Realzeit) übereinstimmen  $\leadsto$  Zeitgeber?
- Temporale Eigenschaften des kontrollierten (physikalischen) Objekts müssen im Rechenystem geeignet abgebildet werden





- **Weich** (engl. *soft*) auch „schwach“
    - **Ergebnis verliert** mit zunehmender Terminüberschreitung **an Wert** (z.B. Bildrate bei Multimediasystemen)
- Terminverletzung ist tolerierbar





- **Weich** (engl. *soft*) auch „schwach“
  - **Ergebnis verliert** mit zunehmender Terminüberschreitung **an Wert** (z.B. Bildrate bei Multimediasystemen)  
→ Terminverletzung ist tolerierbar
- **Fest** (engl. *firm*) auch „stark“
  - **Ergebnis wird** durch eine Terminüberschreitung **wertlos** und wird verworfen (z.B. Abgabetermin einer Übungsaufgabe)  
→ Terminverletzung ist tolerierbar, führt zum Arbeitsabbruch





# Konsequenzen überschrittener Termine

Verbindlichkeit von Terminvorgaben

- **Weich** (engl. *soft*) auch „schwach“
  - Ergebnis **verliert** mit zunehmender Terminüberschreitung **an Wert** (z.B. Bildrate bei Multimediasystemen)
  - Terminverletzung ist tolerierbar
- **Fest** (engl. *firm*) auch „stark“
  - Ergebnis **wird** durch eine Terminüberschreitung **wertlos** und wird verworfen (z.B. Abgabetermin einer Übungsaufgabe)
  - Terminverletzung ist tolerierbar, führt zum Arbeitsabbruch
- **Hart** (engl. *hard*) auch „strikt“
  - **Terminüberschreitung** kann zum **Systemversagen** führen und eine „Katastrophe“ hervorrufen (z.B. Airbag)
  - Terminverletzung ist keinesfalls tolerierbar





- **Fest/Hart**  $\mapsto$  Terminverletzung ist nicht ausgeschlossen<sup>1</sup>
  - Terminverletzung wird vom Betriebssystem erkannt
  - $\rightarrow$  Weiteres Vorgehen hängt von der Art des Termins ab

---

<sup>1</sup> Auch wenn Ablaufplan und Betriebssystem auf dem Blatt Papier Determinismus zeigen, kann das im Feld eingesetzte technische System von unbekanntem/unvermeidbarem Störeinflüssen betroffen sein!





- **Fest/Hart** ↦ Terminverletzung ist nicht ausgeschlossen<sup>1</sup>
  - Terminverletzung wird vom Betriebssystem erkannt
  - Weiteres Vorgehen hängt von der Art des Termins ab

**Fest** ∼ plangemäß weiterarbeiten

- Betriebssystem bricht den Arbeitsauftrag ab
- Nächster Arbeitsauftrag wird (planmäßig) gestartet
- Transparent für die Anwendung

<sup>1</sup> Auch wenn Ablaufplan und Betriebssystem auf dem Blatt Papier Determinismus zeigen, kann das im Feld eingesetzte technische System von unbekanntem/unvermeidbarem Störeinflüssen betroffen sein!





- **Fest/Hart**  $\mapsto$  Terminverletzung ist nicht ausgeschlossen<sup>1</sup>
  - Terminverletzung wird vom Betriebssystem erkannt
  - $\rightarrow$  Weiteres Vorgehen hängt von der Art des Termins ab

**Fest**  $\leadsto$  plangemäß weiterarbeiten

- Betriebssystem bricht den Arbeitsauftrag ab
- Nächster Arbeitsauftrag wird (planmäßig) gestartet
- $\rightarrow$  Transparent für die Anwendung

**hart**  $\leadsto$  sicheren Zustand finden

- Betriebssystem löst eine **Ausnahmesituation** aus
- Ausnahme ist **intransparent für die Anwendung**
- $\rightarrow$  **Anwendung** behandelt diese Ausnahme

<sup>1</sup> Auch wenn Ablaufplan und Betriebssystem auf dem Blatt Papier Determinismus zeigen, kann das im Feld eingesetzte technische System von unbekanntem/unvermeidbarem Störeinflüssen betroffen sein!



- **Hard real-time computer system**  
(dt. Hartes Echtzeitrechensystem)
  - Rechensystem mit mind. einem hartem Termin
  - Garantiert unter allen (spezifizierten) Last- und Fehlerbedingungen
  - Laufzeitverhalten ist ausnahmslos **deterministisch**
  - Typisch für **sicherheitskritische Echtzeitrechensysteme**
    - engl. *safety-critical real-time computer system*
    - Beispiel: Fluglageregelung, Airbag, ...

- **Hard real-time computer system**  
(dt. Hartes Echtzeitrechensystem)
  - Rechensystem mit mind. einem hartem Termin
  - Garantiert unter allen (spezifizierten) Last- und Fehlerbedingungen
  - Laufzeitverhalten ist ausnahmslos **deterministisch**
  - Typisch für **sicherheitskritische Echtzeitrechensysteme**
    - engl. *safety-critical real-time computer system*
    - Beispiel: Fluglageregelung, Airbag, ...
  
- **Soft real-time computer system**  
(dt. Weiches Echtzeitrechensystem)
  - Rechensystem welches keinen harten Termin erreichen muss
  - Termine können gelegentlich verpasst werden



- 1 Problemstellung
  - Kontrolliertes Objekt
  - Realzeitbetrieb
  - Termine
- 2 Allgemeine Grundlagen
  - Begriffsdefinition: Echtzeitrechensystem
  - Terminologie
  - Programmunterbrechungen
  - Verdrängbarkeit
- 3 Echtzeit-Aufgaben
  - Grundsätzliche Umsetzungsalternativen
  - Periodische Aufgaben
  - Nicht-periodische Aufgaben
- 4 Umsetzung und Ablaufplanung
  - Zeitgesteuerte Ausführung
  - Ereignisgesteuerte Ausführung
  - Rangfolge



## Begriffsbildung: Echtzeit-{Anwendung, Rechen}system

---



Hardware



## Begriffsbildung: Echtzeit-{Anwendung, Rechen}system

---

**AUTOSAR**

**ecos**

**LynxOS**  
FROM STRUENDEL

Echtzeitbetriebssystem

**ARM**  
POWERED

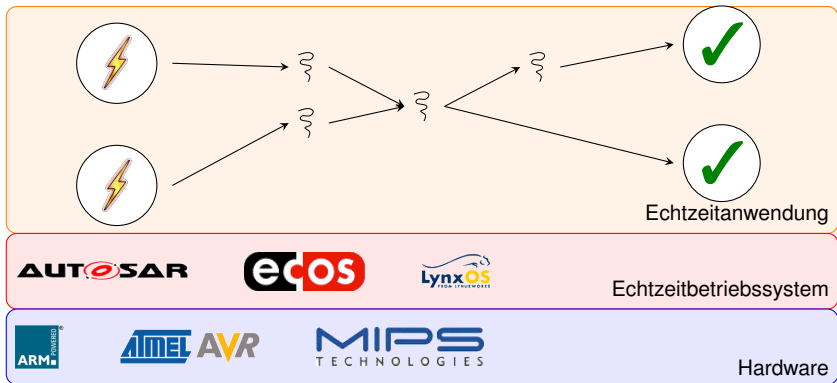
**ATMEL AVR**

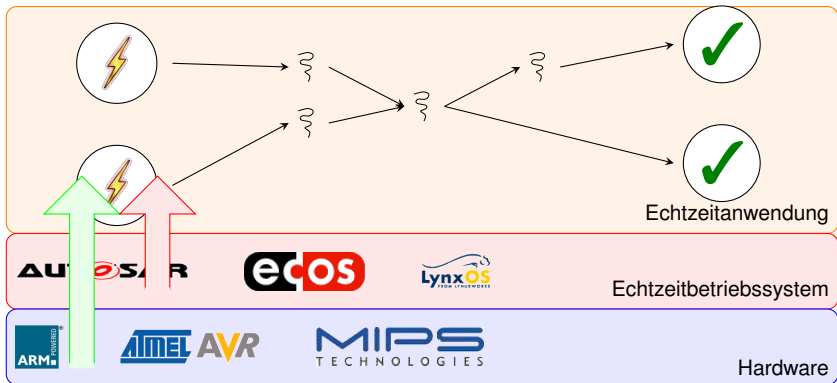
**MIPS**  
TECHNOLOGIES

Hardware



## Begriffsbildung: Echtzeit-{Anwendung, Rechner}system





- Funktionale Eigenschaften
  - Werden **direkt implementiert**

### Eine Funktion

```
uint16_t regelschritt(uint8_t sensorwert)
```



- Funktionale Eigenschaften
  - Werden **direkt implementiert**

### Eine Funktion

```
uint16_t regelschritt(uint8_t sensorwert)
```

- Nicht-funktionale Eigenschaften
  - Beispielsweise **Energie**, **Speicherverbrauch**, **Laufzeitverhalten**
  - Lassen sich **nicht direkt implementieren**
  - Sind **querschneidend**  $\leadsto$  erst im konkreten Kontext bestimmt




- Funktionale Eigenschaften
  - Werden **direkt implementiert**

### Eine Funktion

```
uint16_t regelschritt(uint8_t sensorwert)
```

- Nicht-funktionale Eigenschaften
  - Beispielsweise **Energie**, **Speicherverbrauch**, **Laufzeitverhalten**
  - Lassen sich **nicht direkt implementieren**
  - Sind **querschneidend**  $\leadsto$  erst im konkreten Kontext bestimmt

 **Zeit** aus Sicht des Softwareengineering nicht-funktional

- Führt häufig zu Verwirrung im Kontext von Echtzeitsystemen
- Die **rechtzeitige** Auslösung des Airbags ist funktional?!




- Funktionale Eigenschaften
  - Werden **direkt implementiert**

### Eine Funktion

```
uint16_t regelschritt(uint8_t sensorwert)
```

- Nicht-funktionale Eigenschaften
  - Beispielsweise **Energie**, **Speicherverbrauch**, **Laufzeitverhalten**
  - Lassen sich **nicht direkt implementieren**
  - Sind **querschneidend**  $\leadsto$  erst im konkreten Kontext bestimmt

 **Zeit** aus Sicht des Softwareengineering nicht-funktional

- Führt häufig zu Verwirrung im Kontext von Echtzeitsystemen
- Die **rechtzeitige** Auslösung des Airbags ist funktional?!



Es kommt auf die Betrachtungsebene an!



- Welche Elemente müssen betrachtet werden?
  - Beschränkung auf die Echtzeitanwendung (Regelung)?
  - Vernachlässigung des Echtzeitbetriebssystem?
  - Wie stark hängt dies vom verwendeten Prozessor ab?
  
- Auf welcher Ebene muss die Betrachtung durchgeführt werden?
  - Genügt es eine hohe Abstraktionsebene heranzuziehen?
  - Wo entscheidet sich das zeitliche Ablaufverhalten?



- Welche Elemente müssen betrachtet werden?
  - Beschränkung auf die Echtzeitanwendung (Regelung)?
  - Vernachlässigung des Echtzeitbetriebssystem?
  - Wie stark hängt dies vom verwendeten Prozessor ab?
- Auf welcher Ebene muss die Betrachtung durchgeführt werden?
  - Genügt es eine hohe Abstraktionsebene heranzuziehen?
  - Wo entscheidet sich das zeitliche Ablaufverhalten?



Verwaltungsgemeinkosten der Laufzeitumgebung



- Welche Elemente müssen betrachtet werden?
  - Beschränkung auf die Echtzeitanwendung (Regelung)?
  - Vernachlässigung des Echtzeitbetriebssystem?
  - Wie stark hängt dies vom verwendeten Prozessor ab?
- Auf welcher Ebene muss die Betrachtung durchgeführt werden?
  - Genügt es eine hohe Abstraktionsebene heranzuziehen?
  - Wo entscheidet sich das zeitliche Ablaufverhalten?



Verwaltungsgemeinkosten der Laufzeitumgebung



Exemplarische Illustration anhand von Programmunterbrechungen





Zwei Arten von Programmunterbrechungen:

**synchron** die „Falle“ (engl. *trap*)

**asynchron** die „Unterbrechung“ (engl. *interrupt*)





Zwei Arten von Programmunterbrechungen:

**synchron** die „Falle“ (engl. *trap*)

**asynchron** die „Unterbrechung“ (engl. *interrupt*)

■ Unterschiede ergeben sich hinsichtlich:

- Quelle
- Synchronität
- Vorhersagbarkeit
- Reproduzierbarkeit





Zwei Arten von Programmunterbrechungen:

**synchron** die „Falle“ (engl. *trap*)

**asynchron** die „Unterbrechung“ (engl. *interrupt*)

■ Unterschiede ergeben sich hinsichtlich:

- Quelle
- Synchronität
- Vorhersagbarkeit
- Reproduzierbarkeit



Behandlung ist **zwingend** und grundsätzlich **prozessorabhängig**



- ☞ Zwei Arten von Programmunterbrechungen:
  - synchron die „Falle“ (engl. *trap*)
  - asynchron die „Unterbrechung“ (engl. *interrupt*)

- Unterschiede ergeben sich hinsichtlich:

- Quelle
- Synchronität
- Vorhersagbarkeit
- Reproduzierbarkeit

⚠ Behandlung ist **zwingend** und grundsätzlich **prozessorabhängig**

Wiederholung/Vertiefung empfohlen. . .

Unterbrechungen siehe auch Vorlesung „Betriebssysteme“ [4, Kapitel 2-3]





Ursachen einer **synchrone Programmunterbrechung**:

- Unbekannter Befehl, falsche Adressierungsart oder Rechenoperation
- Systemaufruf, Adressraumverletzung, unbekanntes Gerät

**Trap** → synchron, vorhersagbar, reproduzierbar

- Abhängig vom Arbeitszustand des laufenden Programms:
  - Unverändertes Programm, mit den selben Eingabedaten versorgt
  - Auf ein und dem selben Prozessor zur Ausführung gebracht

→ Unterbrechungsstelle im Programm ist vorhersehbar



Programmunterbrechung/-verzögerung ist **deterministisch**



 Ursachen einer **asynchronen Programmunterbrechung**:

- Signalisierung „externer“ Ereignisse
- Beendigung einer DMA- bzw. E/A-Operation

*Interrupt* → **asynchron, unvorhersagbar, nicht reproduzierbar**

- Unabhängig vom Arbeitszustand des laufenden Programms:
    - Hervorgerufen durch einen „externen Prozess“ (z.B. ein Gerät)
    - Signalisierung eines Ereignis
- Unterbrechungsstelle im Programm ist nicht vorhersehbar



Programmunterbrechung/-verzögerung ist **nicht deterministisch**





Arbeitsaufträge könn(t)en verschränkt ausgeführt werden, wenn:

- Diese verdrängbar sind (typischerweise durch den Planer)





Arbeitsaufträge könn(t)en verschränkt ausgeführt werden, wenn:

- Diese verdrängbar sind (typischerweise durch den Planer)
- Die Zeitbedingungen (engl. *time constraints*) es erlauben





Arbeitsaufträge könn(t)en verschränkt ausgeführt werden, wenn:

- Diese verdrängbar sind (typischerweise durch den Planer)
- Die Zeitbedingungen (engl. *time constraints*) es erlauben



**Präemptivität** (engl. *preemptivity*) ist eine Eigenschaft des jeweiligen Arbeitsauftrags:





Arbeitsaufträge könn(t)en verschränkt ausgeführt werden, wenn:

- Diese verdrängbar sind (typischerweise durch den Planer)
- Die Zeitbedingungen (engl. *time constraints*) es erlauben



**Präemptivität** (engl. *preemptivity*) ist eine Eigenschaft des jeweiligen Arbeitsauftrags:

- **Verdrängbar** (engl. *preemptable*) ist ein Arbeitsauftrag, wenn seine Ausführung suspendiert werden darf
  - **An beliebigen Stellen** (engl. *fully preemptive*)
  - **An ausgewiesenen Stellen** (engl. *preemption points*)





Arbeitsaufträge könn(t)en verschränkt ausgeführt werden, wenn:

- Diese verdrängbar sind (typischerweise durch den Planer)
- Die Zeitbedingungen (engl. *time constraints*) es erlauben



**Präemptivität** (engl. *preemptivity*) ist eine Eigenschaft des jeweiligen Arbeitsauftrags:

- **Verdrängbar** (engl. *preemptable*) ist ein Arbeitsauftrag, wenn seine Ausführung suspendiert werden darf
  - An beliebigen Stellen (engl. *fully preemptive*)
  - An ausgewiesenen Stellen (engl. *preemption points*)
- **Unverdrängbar** (engl. *non-preemptable*), sonst
  - Der Arbeitsauftrag läuft durch (engl. *run-to-completion*)





Arbeitsaufträge könn(t)en verschränkt ausgeführt werden, wenn:

- Diese verdrängbar sind (typischerweise durch den Planer)
- Die Zeitbedingungen (engl. *time constraints*) es erlauben



**Präemptivität** (engl. *preemptivity*) ist eine Eigenschaft des jeweiligen Arbeitsauftrags:

- **Verdrängbar** (engl. *preemptable*) ist ein Arbeitsauftrag, wenn seine Ausführung suspendiert werden darf
  - An beliebigen Stellen (engl. *fully preemptive*)
  - An ausgewiesenen Stellen (engl. *preemption points*)
- **Unverdrängbar** (engl. *non-preemptable*), sonst
  - Der Arbeitsauftrag läuft durch (engl. *run-to-completion*)





Arbeitsaufträge könn(t)en verschränkt ausgeführt werden, wenn:

- Diese verdrängbar sind (typischerweise durch den Planer)
- Die Zeitbedingungen (engl. *time constraints*) es erlauben



**Präemptivität** (engl. *preemptivity*) ist eine Eigenschaft des jeweiligen Arbeitsauftrags:

- **Verdrängbar** (engl. *preemptable*) ist ein Arbeitsauftrag, wenn seine Ausführung suspendiert werden darf
  - An beliebigen Stellen (engl. *fully preemptive*)
  - An ausgewiesenen Stellen (engl. *preemption points*)
- **Unverdrängbar** (engl. *non-preemptable*), sonst
  - Der Arbeitsauftrag läuft durch (engl. *run-to-completion*)



Mischbetrieb  $\rightsquigarrow$  Präemptivität als **Auftragattribut** implementiert



- 1 Problemstellung
  - Kontrolliertes Objekt
  - Realzeitbetrieb
  - Termine
- 2 Allgemeine Grundlagen
  - Begriffsdefinition: Echtzeitrechensystem
  - Terminologie
  - Programmunterbrechungen
  - Verdrängbarkeit
- 3 Echtzeit-Aufgaben
  - Grundsätzliche Umsetzungsalternativen
  - Periodische Aufgaben
  - Nicht-periodische Aufgaben
- 4 Umsetzung und Ablaufplanung
  - Zeitgesteuerte Ausführung
  - Ereignisgesteuerte Ausführung
  - Rangfolge

Zeitgesteuert (engl. *time-triggered*, auch *time driven*)



- Einlastung nur zu festen Zeitpunkten  
→ Vorgegeben durch das Echtzeitrechensystem
- Offline (entkoppelte) Einplanung



## Zeitgesteuert (engl. *time-triggered*, auch *time driven*)



- Einlastung nur zu festen Zeitpunkten  
→ Vorgegeben durch das Echtzeitrechnungssystem
- Offline (entkoppelte) Einplanung

## Ereignisgesteuert (engl. *event-triggered*, auch *event driven*)



- Einlastung zu Ereigniszeitpunkten  
→ Vorgegeben durch das kontrollierte Objekt
- Online (gekoppelte) Einplanung



**Zeitgesteuert** (engl. *time-triggered*, auch *time driven*) ✓

- Einlastung nur zu festen Zeitpunkten  
→ Vorgegeben durch das Echtzeitrechnungssystem
- Offline (entkoppelte) Einplanung

**Reihum gewichtet** (engl. *weighted round robin*)

- Echtzeitverkehr in Hochgeschwindigkeitsnetzen
  - im Koppelnetz (engl. *switched network*)
- Untypisch für die Einplanung von **Arbeitsaufträgen**

**Ereignisgesteuert** (engl. *event-triggered*, auch *event driven*) ✓

- Einlastung zu Ereigniszeitpunkten  
→ Vorgegeben durch das kontrollierte Objekt
- Online (gekoppelte) Einplanung





## Zeitgesteuertes (engl. *time-triggered*) Echtzeitsystem

---



Einlastungszeitpunkte von Arbeitsaufträgen *à priori* bestimmt

- Alle Parameter aller Arbeitsaufträge sind *off-line* bekannt
- WCET, Betriebsmittelbedarf (z.B. Speicher, Fäden, Energie), ...



Verwaltungsgemeinkosten zur Laufzeit sind minimal





# Zeitgesteuertes (engl. *time-triggered*) Echtzeitsystem



Einlastungszeitpunkte von Arbeitsaufträgen *à priori* bestimmt

- Alle Parameter aller Arbeitsaufträge sind *off-line* bekannt
- WCET, Betriebsmittelbedarf (z.B. Speicher, Fäden, Energie), ...



Verwaltungsgemeinkosten zur Laufzeit sind minimal

- Einlastung erfolgt in **variablen** oder **festen Intervallen**
  - Variables Intervall durch **Zeitgeber** (engl. *timer*) mit der Länge des jeweils einzulastenden Arbeitsauftrags programmiert  $\mapsto$  WCET (siehe Kapitel III-3)
    - Jeder Zeitablauf bewirkt eine asynchrone Programmunterbrechung
    - Als Folge findet die Einlastung des nächsten Arbeitsauftrags statt
  - Festes Intervall mittels regelmäßiger Unterbrechungen (Zeitgeber)
    - Festes Zeitraster liegt über die Ausführung der Arbeitsaufträge
    - Dient z.B. dem Abfragen (engl. *polling*) von Sensoren/Geräten





### Einplanung und Einlastungszeitpunkte **vorab nicht bekannt**

- Asynchrone Programmunterbrechungen: Hardwareereignisse
  - Zeitsignal, Bereitstellung von Sensordaten, Beendigung von E/A
- Synchronisationspunkte: ein-/mehrseitige Synchronisation
  - Schlossvariable, Semaphor, Monitor





### Einplanung und Einlastungszeitpunkte **vorab nicht bekannt**

- Asynchrone Programmunterbrechungen: Hardwareereignisse
  - Zeitsignal, Bereitstellung von Sensordaten, Beendigung von E/A
- Synchronisationspunkte: ein-/mehrseitige Synchronisation
  - Schlossvariable, Semaphor, Monitor



### Ereignisse haben **Prioritäten** → **Dringlichkeiten**

- Zuteilung von Betriebsmitteln erfolgt **prioritätsorientiert**
  - Arbeitsaufträge höherer Priorität haben Vorrang
- Prioritäten werden *offline* vergeben und ggf. *online* fortgeschrieben
  - Arbeitsaufträge haben eine statische oder dynamische Priorität
- Betriebsmittel (insb. CPU) bleiben niemals absichtlich ungenutzt
  - Im Gegensatz zur Ereignissteuerung, die Betriebsmittel brach liegen lässt





## Periodische Aufgaben

Aufgaben die in **regelmäßigen Zeitintervallen**<sup>2</sup> kontinuierlich eine vorgegebene Systemfunktion erbringen.

Eine periodische Aufgabe ( $T_i$ ) ist eine Abfolge von Arbeitsaufträgen ( $J_{i,j}$ ) mit vorgegebenen zeitlichen Eigenschaften.

---

<sup>2</sup>Nach [3, S. 40 ff] ist eine periodische Aufgabe nicht wirklich periodisch, da die Abstände zwischen den **Auslösezeiten** (engl. *interrelease time*) eines Arbeitsauftrags einer periodischen Aufgabe nicht der Periode selbst entsprechen müssen. Anderswo werden solche Aufgaben verschiedentlich als sporadische Aufgaben bezeichnet.





## Periodische Aufgaben

Aufgaben die in **regelmäßigen Zeitintervallen**<sup>2</sup> kontinuierlich eine vorgegebene Systemfunktion erbringen.

Eine periodische Aufgabe ( $T_i$ ) ist eine Abfolge von Arbeitsaufträgen ( $J_{i,j}$ ) mit vorgegebenen zeitlichen Eigenschaften.



$$T_i = (p_i, e_i, D_i, \phi_i)$$

$p_i$  Periode (engl. *period*)

$e_i$  Maximale Ausführungszeit (WCET)

$D_i$  Relativer Termin (engl. *deadline*)

$\phi_i$  Phase (engl. *phase*)

$$J_{i,j} = (r_{i,j}, e_{i,j}, d_{i,j})$$

---

<sup>2</sup>Nach [3, S. 40 ff] ist eine periodische Aufgabe nicht wirklich periodisch, da die Abstände zwischen den **Auslösezeiten** (engl. *interrelease time*) eines Arbeitsauftrags einer periodischen Aufgabe nicht der Periode selbst entsprechen müssen. Anderswo werden solche Aufgaben verschiedentlich als sporadische Aufgaben bezeichnet.



## Rückgekoppelte Regelschleife (engl. *feedback control loop*)

initialisiere Stellwert;

initialisiere Zeitgeber und Unterbrecher;

bei Zeitgeberunterbrechung erledige /\* abtasten, regeln, steuern \*/

A/D-Wandlung der Echtzeitinstanz, Echtzeitabbild ziehen;

Echtzeitdatenbasis aktualisieren, neuen Stellwert berechnen;

D/A-Wandlung des Stellwerts, Echtzeitinstanz verändern;

basta



## Rückgekoppelte Regelschleife (engl. *feedback control loop*)

initialisiere Stellwert;

initialisiere Zeitgeber und Unterbrecher;

bei Zeitgeberunterbrechung erledige /\* abtasten, regeln, steuern \*/

A/D-Wandlung der Echtzeitinstanz, Echtzeitabbild ziehen;

Echtzeitdatenbasis aktualisieren, neuen Stellwert berechnen;

D/A-Wandlung des Stellwerts, Echtzeitinstanz verändern;

basta



Die Berechnung von Stellwerten für Aktoren ist eine typische Aufgabe von Echtzeitsystemen

- Das kontrollierte Objekt erfährt eine direkte digitale Regelung
  - Regelungsanwendungen zeigen dabei eine hohe Regelmäßigkeit
- Meist endlose Sequenz von Regelzyklen



Lassen sich Echtzeitsysteme ausschließlich aus periodischen Aufgaben aufbauen?



- Periodische Regelungsaufgaben im *I4Copter*:
  - alle 3 ms Sensorabtastung, Sensordatenfusion
  - alle 9 ms Fluglageregelung
  - alle 21 ms Höhenregelung

Lassen sich Echtzeitsysteme ausschließlich aus periodischen Aufgaben aufbauen?



- Periodische Regelungsaufgaben im *I4Copter*:
  - alle 3 ms Sensorabtastung, Sensordatenfusion
  - alle 9 ms Fluglageregelung
  - alle 21 ms Höhenregelung



Die **zeitliche Auflösung** der Regelung richtet sich nach der **Objektdynamik**





Häufig ist eine eigenständige Beurteilung des Zeitbedarfs nicht möglich, Herstellerangaben ermöglichen die Abschätzung des **schlimmsten Falls**.

<sup>3</sup>Lässt man zugeliferte Bibliotheksfunktionen oder zugekaufte Codegeneratoren außer Acht.





Häufig ist eine eigenständige Beurteilung des Zeitbedarfs nicht möglich,



Herstellerangaben ermöglichen die Abschätzung des **schlimmsten Falls**.

## ■ Beispiel Quadrokopter:

- $d^{imu}$  Gyroskop ITG-3200 – Abtastrate: 4 Hz – 8 kHz [2]
- $d^{adc}$  Infineon TriCore ADC: 280 ns – 2,5  $\mu$ s @ 10 Bit [1]
- $d^{irq}$  Infineon TriCore Arbitrierung: 5 - 11 Takte @ 150 MHz [1]
- $d^{OS}$  CiAO OS Fadenwechsel:  $\leq 219$  Takte @ TriCore (50 MHz) [5]

<sup>3</sup>Lässt man zugeliferte Bibliotheksfunktionen oder zugekaufte Codegeneratoren außer Acht.



- ⚠ Häufig ist eine eigenständige Beurteilung des Zeitbedarfs nicht möglich,  
👉 Herstellerangaben ermöglichen die Abschätzung des **schlimmsten Falls**.

■ Beispiel Quadrokopter:

- $d^{imu}$  Gyroskop ITG-3200 – Abtastrate: 4 Hz – 8 kHz [2]  
 $d^{adc}$  Infineon TriCore ADC: 280 ns – 2,5  $\mu$ s @ 10 Bit [1]  
 $d^{irq}$  Infineon TriCore Arbitrierung: 5 - 11 Takte @ 150 MHz [1]  
 $d^{OS}$  CiAO OS Fadenwechsel:  $\leq 219$  Takte @ TriCore (50 MHz) [5]

- ⚠ Alleine die **Anwendung** kann (fast) komplett kontrolliert werden.<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Lässt man zugeliferte Bibliotheksfunktionen oder zugekaufte Codegeneratoren außer Acht.

- Die Lage des Quadropters wird zyklisch abgetastet, um Abweichungen der aktuellen Lage vom Gleichgewicht zu erkennen:



- Die Lage des Quadropter wird zyklisch abgetastet, um Abweichungen der aktuellen Lage vom Gleichgewicht zu erkennen:

$d^{control}$  Zeitabstand (konstant) zwischen zwei Regelschritten

- Faustregel:  $d^{sample} < (d^{rise} / 10)$

→ Quasi-kontinuierliches Verhalten des diskreten Systems



- Die Lage des Quadropter wird zyklisch abgetastet, um Abweichungen der aktuellen Lage vom Gleichgewicht zu erkennen:

$d^{control}$  Zeitabstand (konstant) zwischen zwei Regelschritten

- Faustregel:  $d^{sample} < (d^{rise} / 10)$
- Quasi-kontinuierliches Verhalten des diskreten Systems

$f^{sample}$  Abtastfrequenz, entspricht  $1/d^{sample}$

- Analoge auf digitale Werte abbilden  $\leadsto$  A/D-Wandlung
- Nyquist-Shannon-Abtasttheorem

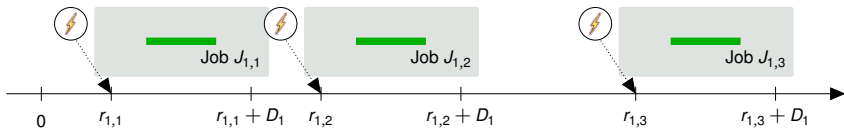




## Nicht-periodische Aufgaben (engl. *non-periodic tasks*)

### Nicht-periodische Aufgaben

Erbringen in **unregelmäßigen Zeitintervallen** eine vorgegebene Systemfunktion. Jede nicht-periodische Aufgabe ( $T_i^S$ ) ist eine Abfolge von Arbeitsaufträgen ( $J_{i,j}$ ) mit vorgegebenen zeitlichen Eigenschaften.



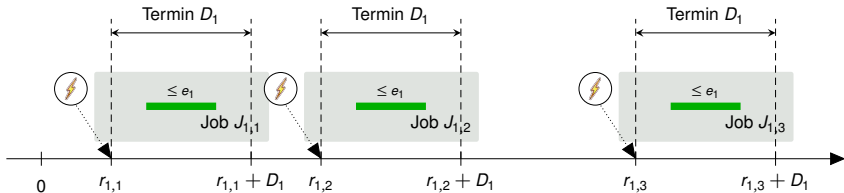


## Nicht-periodische Aufgaben (engl. *non-periodic tasks*)

### Nicht-periodische Aufgaben

Erbringen in **unregelmäßigen Zeitintervallen** eine vorgegebene Systemfunktion. Jede nicht-periodische Aufgabe ( $T_i^S$ ) ist eine Abfolge von Arbeitsaufträgen ( $J_{i,j}$ ) mit vorgegebenen zeitlichen Eigenschaften.

- **Weiche/feste** Termine  $\mapsto$  **Aperiodische Aufgabe** (engl. *aperiodic task*)
- **Harte** Termine  $\mapsto$  **Sporadische Aufgaben** (engl. *sporadic tasks*)



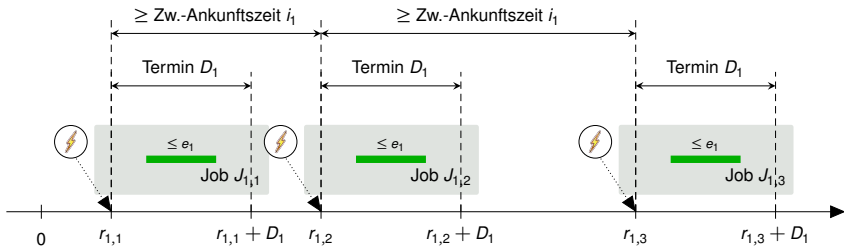


## Nicht-periodische Aufgaben (engl. *non-periodic tasks*)

### Nicht-periodische Aufgaben

Erbringen in **unregelmäßigen Zeitintervallen** eine vorgegebene Systemfunktion. Jede nicht-periodische Aufgabe ( $T_i^S$ ) ist eine Abfolge von Arbeitsaufträgen ( $J_{i,j}$ ) mit vorgegebenen zeitlichen Eigenschaften.

- **Weiche/feste** Termine  $\mapsto$  **Aperiodische Aufgabe** (engl. *aperiodic task*)
- **Harte** Termine  $\mapsto$  **Sporadische Aufgaben** (engl. *sporadic tasks*)
- Besitzen **Minimale Zwischenankunftszeit** (engl. *minimum interarrival-time*)  $i_j$  mit  $[r_{i,j}; r_{i,j+1}]$  zwischen den Auslösezeiten von  $T_i^S$



## Quelle nicht-periodischer Aufgaben

Nicht-periodische Aufgaben behandeln Ereignisse, die sich aus **Zustandsänderungen** des zu kontrollierenden Systems ableiten.



## Quelle nicht-periodischer Aufgaben

Nicht-periodische Aufgaben behandeln Ereignisse, die sich aus **Zustandsänderungen** des zu kontrollierenden Systems ableiten.

- Beispiele für Zustandsänderungen:
  - Mensch-Maschine-Interaktion
    - ⚠ Menschliches Verhalten ist kaum quantifizierbar
  - Kommunikation
  - Fehlerbehandlung



## Quelle nicht-periodischer Aufgaben

Nicht-periodische Aufgaben behandeln Ereignisse, die sich aus **Zustandsänderungen** des zu kontrollierenden Systems ableiten.

- Beispiele für Zustandsänderungen:
  - Mensch-Maschine-Interaktion
    - ⚠ Menschliches Verhalten ist kaum quantifizierbar
  - Kommunikation
  - Fehlerbehandlung



## Beispiel I4Copter:

- Steuerkommandos
  - Empfang über die Fernbedienung
  - Schlimmster Fall: Alle 100 ms
- Telemetriedaten-Übertragung
  - Füllen eines internen Puffers
  - Schlimmster Fall: Alle 9 ms

## Behandlung nicht-periodischer Aufgaben

Grundlegende Behandlungsmethoden für nicht-periodische Ereignisse lassen sich mit minimaler **Unterstützung des Laufzeitsystems** umsetzen. Sie sind sowohl für **zeit- als auch für ereignisgesteuerte Systeme** geeignet und teilweise vollständig auf Anwendungsebene umsetzbar.



## Behandlung nicht-periodischer Aufgaben

Grundlegende Behandlungsmethoden für nicht-periodische Ereignisse lassen sich mit minimaler **Unterstützung des Laufzeitsystems** umsetzen. Sie sind sowohl für **zeit-** als auch für **ereignisgesteuerte Systeme** geeignet und teilweise vollständig auf Anwendungsebene umsetzbar.

- **Unterbrecherbetrieb**  $\rightsquigarrow$  **Nicht-periodische Aufgaben haben Vorfahrt**
  - Ereignisbehandlung direkt in der Unterbrechungsbehandlung
  - Mittels **Ausnahmebehandlungen**



## Behandlung nicht-periodischer Aufgaben

Grundlegende Behandlungsmethoden für nicht-periodische Ereignisse lassen sich mit minimaler **Unterstützung des Laufzeitsystems** umsetzen. Sie sind sowohl für **zeit- als auch für ereignisgesteuerte Systeme** geeignet und teilweise vollständig auf Anwendungsebene umsetzbar.

- **Unterbrecherbetrieb**  $\rightsquigarrow$  **Nicht-periodische Aufgaben haben Vorfahrt**
  - Ereignisbehandlung direkt in der Unterbrechungsbehandlung
  - Mittels **Ausnahmebehandlungen**
- **Hintergrundbetrieb**  $\rightsquigarrow$  **Periodische Aufgaben haben Vorfahrt**
  - Phasen der Untätigkeit für nicht-periodische Aufgaben nutzen
  - Mittels **Verdrängung**



## Behandlung nicht-periodischer Aufgaben

Grundlegende Behandlungsmethoden für nicht-periodische Ereignisse lassen sich mit minimaler **Unterstützung des Laufzeitsystems** umsetzen. Sie sind sowohl für **zeit- als auch für ereignisgesteuerte Systeme** geeignet und teilweise vollständig auf Anwendungsebene umsetzbar.

- **Unterbrecherbetrieb**  $\leadsto$  **Nicht-periodische Aufgaben haben Vorfahrt**
  - Ereignisbehandlung direkt in der Unterbrechungsbehandlung
  - Mittels **Ausnahmebehandlungen**
- **Hintergrundbetrieb**  $\leadsto$  **Periodische Aufgaben haben Vorfahrt**
  - Phasen der Untätigkeit für nicht-periodische Aufgaben nutzen
  - Mittels **Verdrängung**
- **Periodischer Zusteller**  $\leadsto$  **Alles ist eine periodische Aufgabe**
  - Abfragen nicht-periodische Ereignisse durch periodische Aufgaben
  - **Einphasen** nicht-periodischer Aufträge mit bekannten Mitteln



- 1 Problemstellung
  - Kontrolliertes Objekt
  - Realzeitbetrieb
  - Termine
- 2 Allgemeine Grundlagen
  - Begriffsdefinition: Echtzeitrechnungssystem
  - Terminologie
  - Programmunterbrechungen
  - Verdrängbarkeit
- 3 Echtzeit-Aufgaben
  - Grundsätzliche Umsetzungsalternativen
  - Periodische Aufgaben
  - Nicht-periodische Aufgaben
- 4 Umsetzung und Ablaufplanung
  - Zeitgesteuerte Ausführung
  - Ereignisgesteuerte Ausführung
  - Rangfolge





## Die *Busy Loop*

Die wirklich einfachste Variante für die Implementierung zyklischer Systeme?



Periodische Aufgaben wiederholt in einer Schleife ausführen

```
int main(void) {  
  
    while(1) {  
  
        aufgabe1();  
  
    }  
  
    return 0;  
}
```





## Die *Busy Loop*

Die wirklich einfachste Variante für die Implementierung zyklischer Systeme?



Periodische Aufgaben wiederholt in einer Schleife ausführen

```
int main(void) {
    unsigned long cnt = 0;
    while(1) {

        aufgabe1();

        if(cnt % 2 == 0) {
            aufgabe2();
        }

        ++cnt;
    }
    return 0;
}
```

- Längere Perioden lassen sich durch einen **Rundenzähler** ableiten
  - die Schleife definiert einen **Rahmen**
  - Ausrichtendes Raster für **alle Aktivitäten**





# Die *Busy Loop*

Die wirklich einfachste Variante für die Implementierung zyklischer Systeme?



Periodische Aufgaben wiederholt in einer Schleife ausführen

```
int main(void) {
    unsigned long cnt = 0;
    while(1) {
        warte_durchlauf();

        aufgabe1();

        if(cnt % 2 == 0) {
            aufgabe2();
        }

        ++cnt;
    }
    return 0;
}
```

- Längere Perioden lassen sich durch einen **Rundenzähler** ableiten
  - die Schleife definiert einen **Rahmen**
  - Ausrichtendes Raster für **alle Aktivitäten**
- Explizite Überwachung der **Rahmendauer**
  - Ausführungszeit ist i.d.R. **nicht konstant**





# Die *Busy Loop*

Die wirklich einfachste Variante für die Implementierung zyklischer Systeme?



Periodische Aufgaben wiederholt in einer Schleife ausführen

```
int main(void) {
    unsigned long cnt = 0;
    while(1) {
        warte_durchlauf();

        aufgabe1();

        if(cnt % 2 == 0) {
            aufgabe2();
        }
        10ms_nach_aufgabe1();

        ++cnt;
    }
    return 0;
}
```

- Längere Perioden lassen sich durch einen **Rundenzähler** ableiten
  - die Schleife definiert einen **Rahmen**
  - Ausrichtendes Raster für **alle Aktivitäten**
- Explizite Überwachung der **Rahmendauer**
  - Ausführungszeit ist i.d.R. **nicht konstant**
- Schwierige Spezifikation **zeitlichen Versatzes**
  - Abhängigkeit von der **tats. Ausführungszeit**





# Die *Busy Loop*

Die wirklich einfachste Variante für die Implementierung zyklischer Systeme?



Periodische Aufgaben wiederholt in einer Schleife ausführen

```
int main(void) {
    unsigned long cnt = 0;
    while(1) {
        warte_durchlauf();

        aufgabe1();

        if(cnt % 2 == 0) {
            aufgabe2_1();
        }
        10ms_nach_aufgabe1();
        if(cnt % 2 == 0) {
            aufgabe2_2();
        }
        ++cnt;
    }
    return 0;
}
```

- Längere Perioden lassen sich durch einen **Rundenzähler** ableiten
  - die Schleife definiert einen **Rahmen**
  - Ausrichtendes Raster für **alle Aktivitäten**
- Explizite Überwachung der **Rahmendauer**
  - Ausführungszeit ist i.d.R. **nicht konstant**
- Schwierige Spezifikation **zeitlichen Versatzes**
  - Abhängigkeit von der **tats. Ausführungszeit**
- Konflikte durch **lange andauernde Aufträge**
  - Evtl. ist eine **manuelle Aufteilung** nötig





# Die *Busy Loop*

Die wirklich einfachste Variante für die Implementierung zyklischer Systeme?



Periodische Aufgaben wiederholt in einer Schleife ausführen

```
int main(void) {
    unsigned long cnt = 0;
    while(1) {
        warte_durchlauf();
        kontrolle_start();
        aufgabe1();
        kontrolle_stop();

        if(cnt % 2 == 0) {
            aufgabe2_1();
        }

        10ms_nach_aufgabe1();

        if(cnt % 2 == 0) {
            aufgabe2_2();
        }

        ++cnt;
    }
    return 0;
}
```

- Längere Perioden lassen sich durch einen **Rundenzähler** ableiten
  - die Schleife definiert einen **Rahmen**
  - Ausrichtendes Raster für **alle Aktivitäten**
- Explizite Überwachung der **Rahmendauer**
  - Ausführungszeit ist i.d.R. **nicht konstant**
- Schwierige Spezifikation **zeitlichen Versatzes**
  - Abhängigkeit von der **tats. Ausführungszeit**
- Konflikte durch **lange andauernde Aufträge**
  - Evtl. ist eine **manuelle Aufteilung** nötig
- **Überwachung** der Ausführungszeit
  - Schwieriger **Abbruch** des betroffenen Auftrags





Vorberechneter (statischer) Ablaufplan  $\mapsto$  **Ablauf-tabelle**

- Jeder Tabelleneintrag entspricht einer Einplanungsentscheidung zu einem (vorab) bestimmten Zeitpunkt auf der Echtzeitachse





Vorberechneter (statischer) Ablaufplan  $\mapsto$  **Ablauftabelle**

- Jeder Tabelleneintrag entspricht einer Einplanungsentscheidung zu einem (vorab) bestimmten Zeitpunkt auf der Echtzeitachse
- Bei Einlastung wird ein **Zeitgeber** (engl. *timer*) programmiert und der Arbeitsauftrag wird gestartet
  - Kurzzeitwecker auf nächsten Entscheidungszeitpunkt stellen
  - Einzustellender Wert ist im aktuellen Tabelleneintrag zu finden





Vorberechneter (statischer) Ablaufplan  $\mapsto$  **Ablauftabelle**

- Jeder Tabelleneintrag entspricht einer Einplanungsentscheidung zu einem (vorab) bestimmten Zeitpunkt auf der Echtzeitachse
  - Bei Einlastung wird ein **Zeitgeber** (engl. *timer*) programmiert und der Arbeitsauftrag wird gestartet
    - Kurzzeitwecker auf nächsten Entscheidungszeitpunkt stellen
    - Einzustellender Wert ist im aktuellen Tabelleneintrag zu finden
- Ein **Zeitgebersignal** schaltet zum nächsten Tabelleneintrag weiter



### Vorberechneter (statischer) Ablaufplan $\mapsto$ **Ablauftabelle**

- Jeder Tabelleneintrag entspricht einer Einplanungsentscheidung zu einem (vorab) bestimmten Zeitpunkt auf der Echtzeitachse
  - Bei Einlastung wird ein **Zeitgeber** (engl. *timer*) programmiert und der Arbeitsauftrag wird gestartet
    - Kurzzeitwecker auf nächsten Entscheidungszeitpunkt stellen
    - Einzustellender Wert ist im aktuellen Tabelleneintrag zu finden
- $\rightarrow$  Ein **Zeitgebersignal** schaltet zum nächsten Tabelleneintrag weiter

### Am Tabellenende wird wieder zum -anfang gesprungen

- **Zyklischer Ablaufplan** (engl. *cyclic schedule*) periodischer Aufgaben
- $\rightarrow$  Die **Hyperperiode** (siehe Folie ??) gibt die Tabellengröße vor





Einplanung von Arbeitsaufträgen erfolgt zu **Ereigniszeitpunkten**

- Ihr Auftreten ist nicht (exakt) vorhersehbar
  - Ereignisauslöser sind kontrollierte Objekte/andere Arbeitsaufträge
- Die Ereignisverarbeitung unterliegt einer gewissen **Dringlichkeit**





Einplanung von Arbeitsaufträgen erfolgt zu **Ereigniszeitpunkten**

- Ihr Auftreten ist nicht (exakt) vorhersehbar
  - Ereignisauslöser sind kontrollierte Objekte/andere Arbeitsaufträge
- Die Ereignisverarbeitung unterliegt einer gewissen **Dringlichkeit**



**Ereignisse haben Prioritäten** die dem Ereignisauslöser und/oder der Ereignisverarbeitung zugeordnet sind

**Feste Zuordnung** → Ereignisverarbeitung/-auslöser

- Arbeitsaufträge erhalten **absolute Priorität**

**Variable Zuordnung** → Ereignisverarbeitung

- Arbeitsaufträge erhalten **relative Priorität**





Einplanung von Arbeitsaufträgen erfolgt zu **Ereigniszeitpunkten**

- Ihr Auftreten ist nicht (exakt) vorhersehbar
  - Ereignisauslöser sind kontrollierte Objekte/andere Arbeitsaufträge
- Die Ereignisverarbeitung unterliegt einer gewissen **Dringlichkeit**



**Ereignisse haben Prioritäten** die dem Ereignisauslöser und/oder der Ereignisverarbeitung zugeordnet sind

**Feste Zuordnung** → Ereignisverarbeitung/-auslöser

- Arbeitsaufträge erhalten **absolute Priorität**

**Variable Zuordnung** → Ereignisverarbeitung

- Arbeitsaufträge erhalten **relative Priorität**

Auch **prioritätsorientierte Einplanung** (engl. *priority-driven scheduling*)





Verfahren zur **prioritätsorientierten Einplanung** periodischer Arbeitsaufträge werden folglich in zwei Gruppen eingeteilt:





Verfahren zur **prioritätsorientierten Einplanung** periodischer Arbeitsaufträge werden folglich in zwei Gruppen eingeteilt:

**Feste Priorität** (engl. *fixed priority* oder *static priority*)

- Priorität der Aufträge einer Aufgabe sind **unveränderlich**
  - Die Aufgabenpriorität steht unabhängig von der Auslösung bzw. Beendigung von Arbeitsaufträgen fest
- Prioritäten werden **statisch zum Entwurfszeitpunkt** vergeben





Verfahren zur **prioritätsorientierten Einplanung** periodischer Arbeitsaufträge werden folglich in zwei Gruppen eingeteilt:

**Feste Priorität** (engl. *fixed priority* oder *static priority*)

- Priorität der Aufträge einer Aufgabe sind **unveränderlich**
  - Die Aufgabenpriorität steht unabhängig von der Auslösung bzw. Beendigung von Arbeitsaufträgen fest
- Prioritäten werden **statisch zum Entwurfszeitpunkt** vergeben

**Dynamische Priorität** (engl. *dynamic priority*)

- Priorität der Aufträge einer Aufgabe sind **veränderlich**
  - Aufgabenpriorität variiert relativ zu anderen Aufgaben, wenn Arbeitsaufträge ausgelöst bzw. beendet werden
- Prioritäten werden **dynamisch zur Laufzeit** vergeben





## Einplanung gemäß Ausführungsrate

Rate  $1/p_i$  einer Aufgabe  $T_i$  ist die Inverse ihrer Periode  $p_i$

- Bezogen auf die Auslöserate von Arbeitsaufträgen in  $T_i$

→ Je kleiner die Periode, desto höher die **Priorität**  $P_i$  von  $T_i$

- **Beispiel:**  $T_1 = (4, 1)$ ,  $T_2 = (5, 2)$ ,  $T_3 = (20, 5)$ 
  - Perioden  $p = \{4, 5, 20\}$ , Ausführungszeiten  $e = \{1, 2, 5\}$
  - ⚠ Termin und Phase optional bei  $D_i = p_i$  und  $\phi_i = 0$





## Einplanung gemäß Ausführungsrate

Rate  $1/p_i$  einer Aufgabe  $T_i$  ist die Inverse ihrer Periode  $p_i$

- Bezogen auf die Auslöserate von Arbeitsaufträgen in  $T_i$

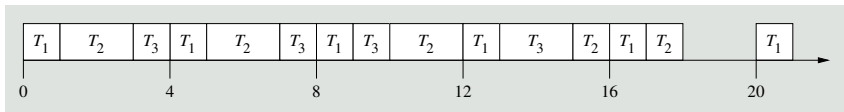
→ Je kleiner die Periode, desto höher die **Priorität**  $P_i$  von  $T_i$

- **Beispiel:**  $T_1 = (4, 1)$ ,  $T_2 = (5, 2)$ ,  $T_3 = (20, 5)$

- Perioden  $p = \{4, 5, 20\}$ , Ausführungszeiten  $e = \{1, 2, 5\}$

⚠ Termin und Phase optional bei  $D_i = p_i$  und  $\phi_i = 0$

- **Ablaufplan:**





## Einplanung gemäß Ausführungsrate

Rate  $1/p_i$  einer Aufgabe  $T_i$  ist die Inverse ihrer Periode  $p_i$

- Bezogen auf die Auslöserate von Arbeitsaufträgen in  $T_i$

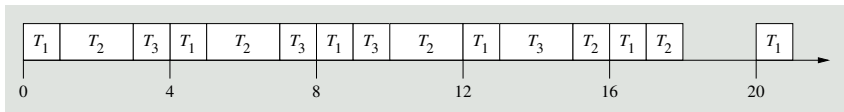
→ Je kleiner die Periode, desto höher die **Priorität**  $P_i$  von  $T_i$

- **Beispiel:**  $T_1 = (4, 1)$ ,  $T_2 = (5, 2)$ ,  $T_3 = (20, 5)$

- Perioden  $p = \{4, 5, 20\}$ , Ausführungszeiten  $e = \{1, 2, 5\}$

⚠ Termin und Phase optional bei  $D_i = p_i$  und  $\phi_i = 0$

- **Ablaufplan:**



Arbeitsaufträge werden in ihren Aufgabenperioden ausgeführt

→ RM lässt Prozessor bei ausführerbereiten Aufträgen nicht untätig



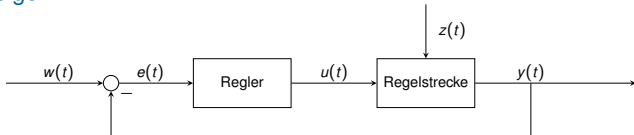


Ausführung von Arbeitsaufträgen unterliegt häufig einer **bestimmten Reihenfolge**  
→ Rangfolge





Ausführung von Arbeitsaufträgen unterliegt häufig einer **bestimmten Reihenfolge**  
↳ **Rangfolge**



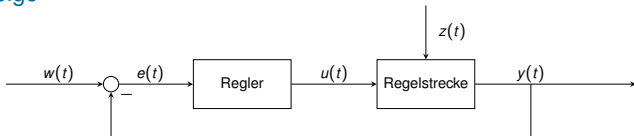
## ■ Beispiel: **Regelungsanwendung**

- Signalverarbeitungsauftrag muss vor der Regelung gelaufen sein





Ausführung von Arbeitsaufträgen unterliegt häufig einer **bestimmten Reihenfolge**  
↳ **Rangfolge**



■ Beispiel: **Regelungsanwendung**

- Signalverarbeitungsauftrag muss vor der Regelung gelaufen sein

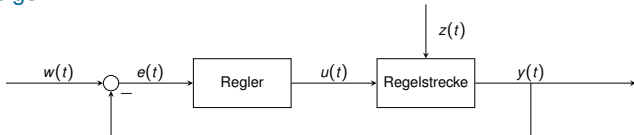
■ Beispiel: **Kommunikationssystem**

- Sendeauftrag muss vor Empfangsauftrag gelaufen sein
- Empfangsauftrag muss vor Bestätigungsauftrag gelaufen sein





Ausführung von Arbeitsaufträgen unterliegt häufig einer **bestimmten Reihenfolge**  
↳ **Rangfolge**



## ■ Beispiel: **Regelungsanwendung**

- Signalverarbeitungsauftrag muss vor der Regelung gelaufen sein

## ■ Beispiel: **Kommunikationssystem**

- Sendeauftrag muss vor Empfangsauftrag gelaufen sein
- Empfangsauftrag muss vor Bestätigungsauftrag gelaufen sein

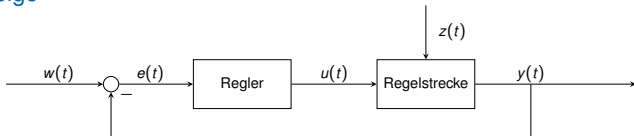
## ■ Beispiel: **Anfragesystem**

- Eingabeauftrag muss vor Suchauftrag gelaufen sein
- Suchauftrag muss vor Ausgabeauftrag gelaufen sein





Ausführung von Arbeitsaufträgen unterliegt häufig einer **bestimmten Reihenfolge**  
↳ **Rangfolge**



- Beispiel: **Regelungsanwendung**
    - Signalverarbeitungsauftrag muss vor der Regelung gelaufen sein
  - Beispiel: **Kommunikationssystem**
    - Sendeauftrag muss vor Empfangsauftrag gelaufen sein
    - Empfangsauftrag muss vor Bestätigungsauftrag gelaufen sein
  - Beispiel: **Anfragesystem**
    - Eingabeauftrag muss vor Suchauftrag gelaufen sein
    - Suchauftrag muss vor Ausgabeauftrag gelaufen sein
- Rangfolge ist oft in **Datenabhängigkeiten** begründet





Arbeitsaufträge benötigen ggf. **konsumierbare Betriebsmittel**

- Anzahl ist (log.) unbegrenzt: Nachrichten, Signale, Interrupts

**Produzent** kann beliebig viele davon erzeugen

**Konsument** zerstört sie wieder bei Inanspruchnahme





Arbeitsaufträge benötigen ggf. **konsumierbare Betriebsmittel**

- Anzahl ist (log.) unbegrenzt: Nachrichten, Signale, Interrupts

**Produzent** kann beliebig viele davon erzeugen

**Konsument** zerstört sie wieder bei Inanspruchnahme

→ Zwischen ihnen besteht eine **gerichtete Abhängigkeit**





Arbeitsaufträge benötigen ggf. **konsumierbare Betriebsmittel**

- Anzahl ist (log.) unbegrenzt: Nachrichten, Signale, Interrupts

**Produzent** kann beliebig viele davon erzeugen

**Konsument** zerstört sie wieder bei Inanspruchnahme

→ Zwischen ihnen besteht eine **gerichtete Abhängigkeit**



Produzent und Konsument sind voneinander **abhängige Entitäten**





Arbeitsaufträge benötigen ggf. **konsumierbare Betriebsmittel**

- Anzahl ist (log.) unbegrenzt: Nachrichten, Signale, Interrupts

**Produzent** kann beliebig viele davon erzeugen

**Konsument** zerstört sie wieder bei Inanspruchnahme

→ Zwischen ihnen besteht eine **gerichtete Abhängigkeit**



Produzent und Konsument sind voneinander **abhängige Entitäten**

- Abhängigkeit: Konsument → Produzent
  - Betriebsmittel muss vor Inanspruchnahme zunächst bereitgestellt werden





Arbeitsaufträge benötigen ggf. **konsumierbare Betriebsmittel**

- Anzahl ist (log.) unbegrenzt: Nachrichten, Signale, Interrupts

**Produzent** kann beliebig viele davon erzeugen

**Konsument** zerstört sie wieder bei Inanspruchnahme

→ Zwischen ihnen besteht eine **gerichtete Abhängigkeit**



Produzent und Konsument sind voneinander **abhängige Entitäten**

- Abhängigkeit: Konsument → Produzent

– Betriebsmittel muss vor Inanspruchnahme zunächst bereitgestellt werden

- Abhängigkeit: Produzent → Konsument (seltener)

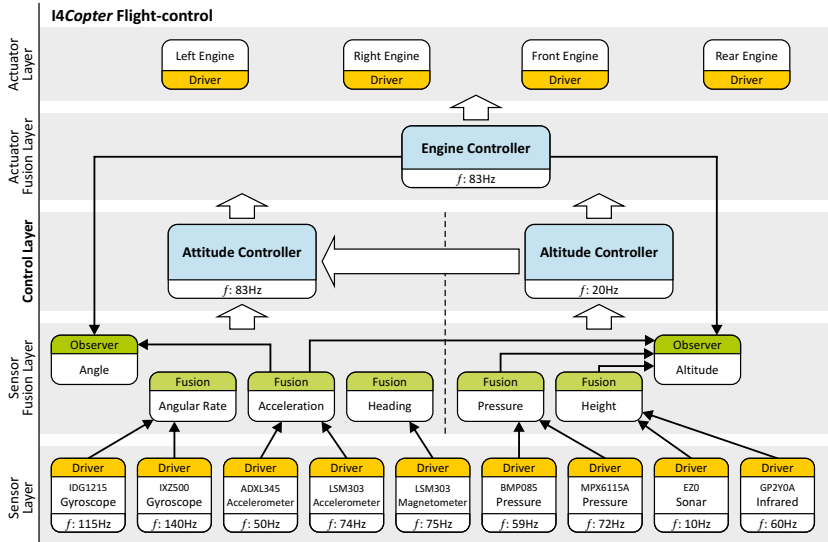
– Abbildung **konsumierbare** ↔ **wiederverwendbare Betriebsmittel**

– Beispiel: **begrenzter Puffer** (engl. *bounded buffer*)

→ Produzent fordert ein wiederverwendbares Betriebsmittel an, welches vom Konsumenten später wieder freizugeben ist



# Datenabhängigkeiten im I4Copter





# Übergang zwischen zeitlichen Domänen

Produzenten und Konsumenten werden mit unterschiedlichen Raten aktiviert



Koordinierung verschiedener zeitlicher Domänen (vgl. Folie 38)

- Unterschiedliche Raten in den Bereichen des Echtzeitsystems
- Gerichtete Abhängigkeiten erfordern **Angleichung**

---

<sup>4</sup>Sonderfall in der digitalen Signalverarbeitung: Zukünftige Messwerte lassen sich mittels Modellen des physikalischen Systems in gewissem Umfang vorhersagen.





# Übergang zwischen zeitlichen Domänen

Produzenten und Konsumenten werden mit unterschiedlichen Raten aktiviert



Koordinierung verschiedener zeitlicher Domänen (vgl. Folie 38)

- Unterschiedliche Raten in den Bereichen des Echtzeitsystems

→ Gerichtete Abhängigkeiten erfordern **Angleichung**

■ Datenaustausch zwischen Produzent und Konsument

- Erfolgt in Abstimmung → Konsument erwartet Daten
- Aufwand abhängig von der Diskrepanz der Raten

---

<sup>4</sup>Sonderfall in der digitalen Signalverarbeitung: Zukünftige Messwerte lassen sich mittels Modellen des physikalischen Systems in gewissem Umfang vorhersagen.





# Übergang zwischen zeitlichen Domänen

Produzenten und Konsumenten werden mit unterschiedlichen Raten aktiviert



Koordinierung verschiedener zeitlicher Domänen (vgl. Folie 38)

- Unterschiedliche Raten in den Bereichen des Echtzeitsystems
- Gerichtete Abhängigkeiten erfordern **Angleichung**

■ Datenaustausch zwischen Produzent und Konsument

- Erfolgt in Abstimmung → Konsument erwartet Daten
- Aufwand abhängig von der Diskrepanz der Raten



Typisches Vorgehen in Echtzeitanwendungen

- **Gemeinsamer Puffer** als Zwischenspeicher → Produzent schneller
  - Problem: Puffergröße und WCET (Abarbeitung des Rückstands)
- **Prädikation** durch Beobachter → Konsument schneller<sup>4</sup>
  - Generierung von Zwischenwerten kompensiert langsamen Produzenten
- **Letzter Wert genügt** (engl. *last is best*) → beidseitig
  - Verzicht auf explizite Abstimmung (**simpel**)
  - **Alter unterliegt gewissen Schwankungen**

<sup>4</sup>Sonderfall in der digitalen Signalverarbeitung: Zukünftige Messwerte lassen sich mittels Modellen des physikalischen Systems in gewissem Umfang vorhersagen.



- [1] Infineon Technologies AG (Hrsg.):  
*TC1796 User's Manual (V2.0)*.  
St.-Martin-Str. 53, 81669 München, Germany: Infineon Technologies AG, Jul. 2007
- [2] InvenSense Inc.:  
*ITG-3200 Product Specification Revision 1.4*.  
<http://invensense.com/mems/gyro/documents/PS-ITG-3200A.pdf>, 2010. –  
Data Sheet
- [3] Liu, J. W. S.:  
*Real-Time Systems*.  
Englewood Cliffs, NJ, USA : Prentice Hall PTR, 2000. –  
ISBN 0-13-099651-3
- [4] Lohmann, D. :  
*Vorlesung: Betriebssysteme, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*.  
[https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS15/V\\_BS](https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS15/V_BS), 2015
- [5] Lohmann, D. ; Hofer, W. ; Schröder-Preikschat, W. ; Streicher, J. ; Spinczyk, O. :  
*CiAO: An Aspect-Oriented Operating-System Family for Resource-Constrained Embedded Systems*.  
In: *Proceedings of the 2009 USENIX Annual Technical Conference*.  
USENIX Association. –  
ISBN 978-1-931971-68-3, 215-228