

# DIY – Individual Prototyping and Systems Engineering

## Grundlagen und Terminologie

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

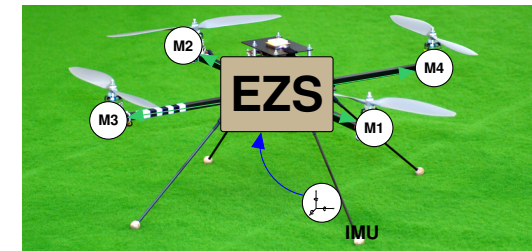
<https://www4.cs.fau.de>

17. Mai 2017



# Aufbau des Demonstrators

Eine elementare Kontrollschleife: Die Fluglageregelung



Quadroptere 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 -Rechnensystem



# Kontrolle und Regelung des physikalischen Objekts

Übertragungsfunktion und Antwortfunktion

- 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, ...  
 $\rightarrow$  **Objektdynamik** und **-physik**



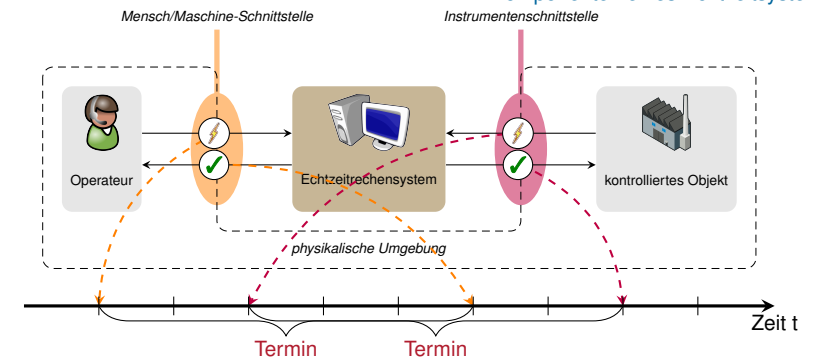
Dies ist die Welt der **Steuerungs-** und **Regelungsanwendungen**

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



# Kopplung mit der (realen) Umwelt

Komponenten eines Echtzeitsystems



- Echtzeitrechnensystem 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



## Verarbeitung von Programmen in Echtzeit

Realzeitverarbeitung (engl. *real-time processing*)

- ⚠ **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 impliziert nicht unbedingt Rechtzeitigkeit

Zuverlässige Reaktion des Rechensystems auf Umgebungsereignisse

- ⚠ **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?
  - $\rightarrow$  Temporale Eigenschaften des kontrollierten (physikalischen) Objekts müssen im Rechensystem geeignet abgebildet werden



## Konsequenzen überschrittener Termine

Verbindlichkeit von Terminvorgaben

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



## Arten von Echtzeitsystemen

Fest  $\leftrightarrow$  Hart

- **Fest/Hart**  $\leftrightarrow$  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 unbekannt/unvermeidbaren Störeinflüssen betroffen sein!



## Arten von Echtzeitsystemen (Forts.)

Radikale Unterschiede im Systementwurf zeichnen sich ab...

### ■ Hard real-time computer system

(dt. Hartes Echtzeitrechnungssystem)

- Rechner mit mind. einem harten Termin
- Garantiert unter allen (spezifizierten) Last- und Fehlerbedingungen
- Laufzeitverhalten ist ausnahmslos **deterministisch**
- Typisch für **sicherheitskritische Echtzeitrechnungssysteme**
  - engl. *safety-critical real-time computer system*
  - Beispiel: Fluglageregelung, Airbag, ...

### ■ Soft real-time computer system

(dt. Weiches Echtzeitrechnungssystem)

- Rechner, welches keinen harten Termin erreichen muss
- Termine können gelegentlich verpasst werden

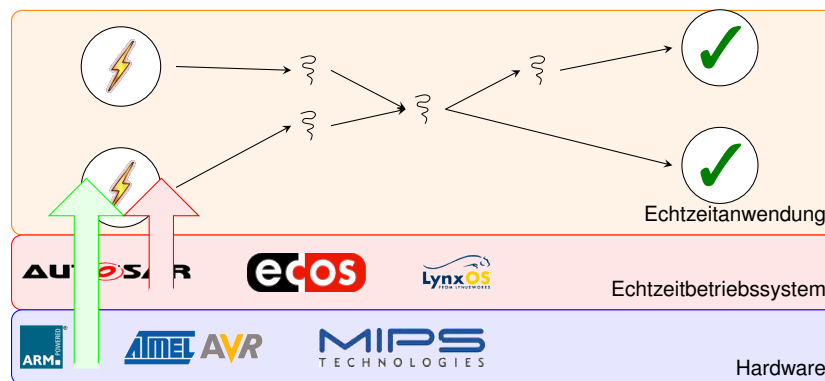


## Gliederung

- 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



## Begriffsbildung: Echtzeit-{Anwendung, Rechner}



## Exkurs: Funktionale und nicht-funktionale Eigenschaften

### ■ 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** ~> 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!



## Zeitliches Verhalten von Echtzeitanwendungen

Allgemeine Kosten des Echtzeitrechnungssystems

- Welche Elemente müssen betrachtet werden?
    - Beschränkung auf die Echtzeitanwendung (Regelung)?
    - Vernachlässigung des Echtzeitbetriebssystems?
    - 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



## Unterbrechungsarten

- 📖 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]



## Synchrone Programmunterbrechung (engl. *trap*)

- 📖 Ursachen einer **synchronen** 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**



## Asynchrone Programmunterbrechung (engl. *interrupt*)

- 📖 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**



## Verdrängbarkeit

Verschränkung (engl. *interleaving*) von Arbeitsaufträgen

⚠ 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  $\leadsto$  Präemptivität als **Auftragattribut** implementiert



## Gliederung

- 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



## Grundsätzliche Verfahren

Vorangetrieben durch interne oder externe Ereignisse

**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

- Einlastung erfolgt in **variablen** oder **festen Intervallen**
  - Variables Intervall durch **Zeitgeber** (engl. *timer*) mit der Länge des jeweils einzulastenden Arbeitsauftrags programmiert  $\rightarrow$  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



## ⚠ Ereignisgesteuertes (engl. *event-triggered*) Echtzeitsystem

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

- Asynchrone Programmunterbrechungen: Hardwareereignisse
  - Zeitsignal, Bereitstellung von Sensordaten, Beendigung von E/A
- Synchronisationspunkte: ein-/mehreseitige Synchronisation
  - Schlossvariable, Semaphore, 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 Aufgabe (engl. *periodic task*)

### 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.



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

$\rho_i$  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.



## Periodische Echtzeitsysteme in der Praxis

Lassen sich Echtzeitsysteme ausschließlich aus periodischen Aufgaben aufbauen?

### 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**



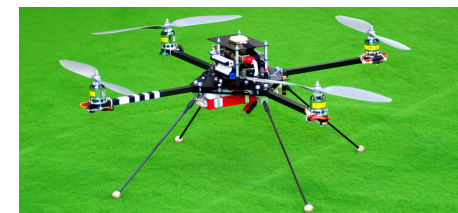
Die Berechnung von Stellwerten für Aktoren ist eine typische Aufgabe von Echtzeitsystemen

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



## Periodische Echtzeitsysteme in der Praxis (Forts.)

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**



## Zeitbedarf im Echtzeitsystem

Welche Komponenten benötigen wie viel Zeit?

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

### ■ Beispiel Quadrocopter:

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



## Abbildung der Fluglageregelung

Ein paar Daumenregeln

- Die Lage des Quadrocopter 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

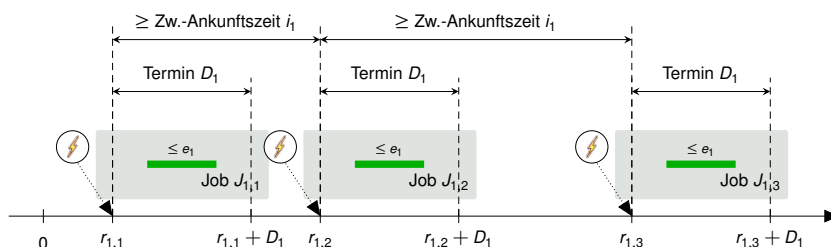


## ⚠ Nicht-periodische Aufgaben (engl. *non-periodic tasks*)

### 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.

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



## Nicht-periodische Aufgaben in der Praxis

### 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

### 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



## Gliederung

- 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) {
    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



## Abarbeitung statischer Ablaufpläne

Tabellengesteuerte Einlastung von Arbeitsaufträgen



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

- 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



Am Tabellenende wird wieder zum -anfang gesprungen

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



## Ereignisorientierte Einplanung

(engl. *event-driven scheduling*)

### 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*)



## Prioritätsorientierte Algorithmen

Klassifikation

### 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



## RM – Ratenmonotone Einplanung

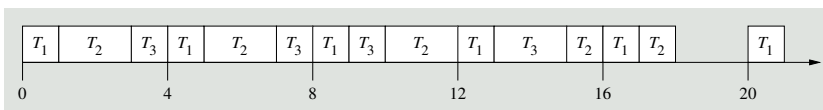
[3, S.118]

### 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

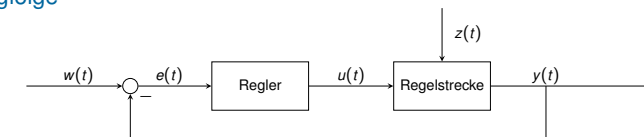
- RM lässt Prozessor bei ausführbaren Aufträgen nicht untätig



## Rangfolge (engl. *precedence*)

Abhängigkeit von Kontrollflüssen

### 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



## Datenabhängigkeit (engl. *data dependency*)

Abhängigkeit von konsumierbaren Betriebsmitteln

Arbeitsaufträge benötigen ggf. **konsumierbare Betriebsmittel**

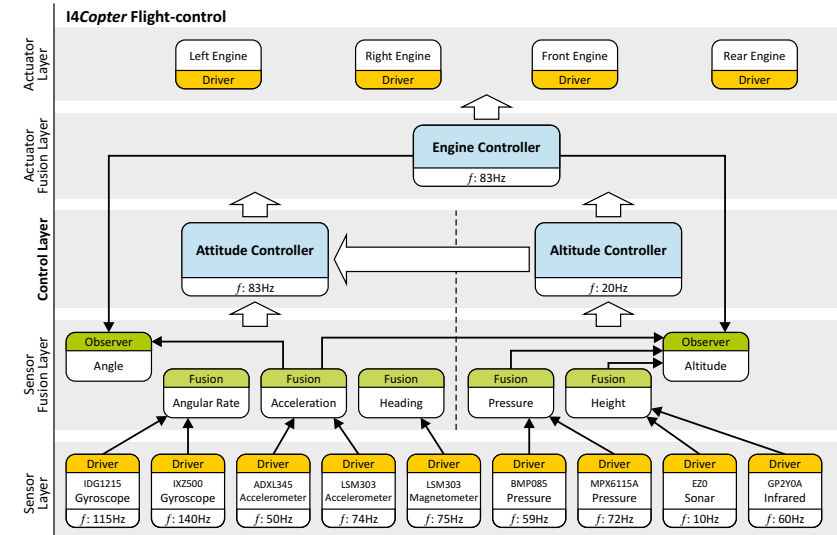
- Anzahl ist (log.) unbegrenzt: Nachrichten, Signale, Interrupts
  - Produzent kann beliebig viele davon erzeugen
  - Konsument zerstört sie wieder bei Inanspruchnahme
- Zwischen ihnen besteht eine **gerichtete Abhängigkeit**

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**

■ 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.



## Literaturverzeichnis

- [1] Inc., I.:  
*ITG-3200 Product Specification Revision 1.4.*  
<http://invensense.com/mems/gyro/documents/PS-ITG-3200A.pdf>, 2010. – Data Sheet
- [2] Infineon Technologies AG (Hrsg.):  
*TC1796 User's Manual (V2.0).*  
St.-Martin-Str. 53, 81669 München, Germany: Infineon Technologies AG, Jul. 2007
- [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.*  
Berkeley, CA, USA: USENIX Association, Jun. 2009. – ISBN 978-1-931971-68-3, S. 215-228

