

Echtzeitsysteme

Physikalisches System $\leftrightarrow$ Kontrollierendes Rechensystem

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

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

28. Oktober 2016



⚠ **Echtzeitbetrieb** bedeutet **Rechtzeitigkeit** (vgl. Folie II/10 ff)

- Die funktionale Korrektheit ist nicht ausreichend
- Zeitliche (temporale) Korrektheit!

⚠ **Terminvorgaben** sind **anwendungsabhängig**

- Komplexität des physikalischen Systems (vgl. Folie II/18 ff)
- Bestimmt durch die Kopplung an die (reale) Umwelt

⚠ **Geschwindigkeit ist keine Garantie**

- Komplexität des Echtzeitrechensystems
- Entscheidend ist das tatsächliche Laufzeitverhalten

👉 **Woher kommen die zeitlichen Vorgaben und Eigenschaften?**

- Wo sind die Berührungspunkte mit dem **physikalischen System**?
- Welche Rolle spielt das **Echtzeitrechensystem**?



- 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!



1 Physikalisches System und Echtzeitanwendung

- Kontrolliertes Objekt
- Zusammenspiel

2 Echtzeitrechensystem

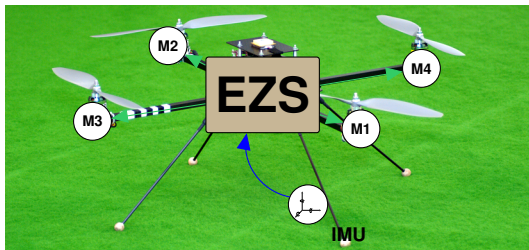
- Grundlagen: Programmunterbrechungen
- Ausnahmebehandlung
- Zustandssicherung
- Ableitung des Zeitbedarfs

3 Zusammenfassung



Aufbau des Demonstrators

Eine elementare Kontrollschleife: Die Fluglageregelung



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



Wie lange dauert es bis zum Gleichgewicht?

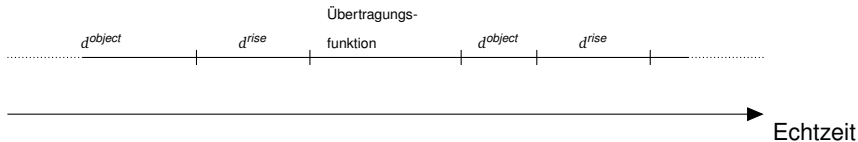
- Gewicht, Leistungsfähigkeit der Motoren, Bauart der Rotorblätter, ...
- Objektdynamik und -physik



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





👉 Zeitverzögerung (d , delay) des Quadropters:

d^{object} Zeitdauer bis zum Beginn der Lageänderung

- Hervorgerufen durch die (initiale) Trägheit des Objektes
- Prozessverzögerung (engl. *process/object delay*)

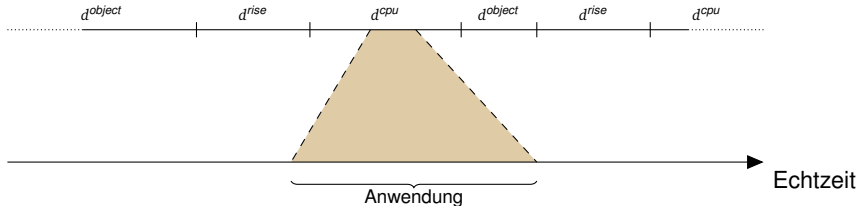
d^{rise} Zeitdauer bis zum (erneuten) Gleichgewicht

- Allgemein: Erreichen der Zielgröße (typ. 66 % bzw. 90 %)
- Bestimmt durch die Fähigkeit der Aktorik → Einschwingverhalten
- Anregel-/ Anlaufzeit (engl. *rise time*) einer Sprungantwort



Zeitparameter des Rechensystems

Berechnung der Übertragungsfunktion: Alles braucht seine Zeit



Zeitverzögerung des Rechensystems

- Auswertung: Abweichung (Soll/Ist) und Übertragungsfunktion (Regler)
- ⚠ Das Rechensystem benötigt Zeit für die Berechnung

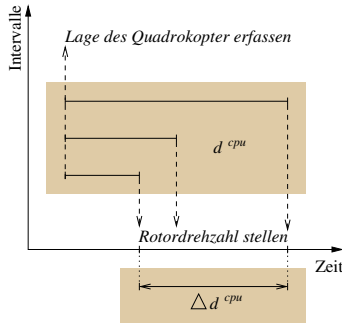
d^{cpu} Zeitdauer bis zur Ausgabe des neuen Stellwertes

- Erfassung der Umgebung durch Sensoren
- Berechnung des Regelungsalgorithmus
- Kontrollieren des Objekts durch Aktorik



Schwankungen (engl. *jitter*) in den Zeitparametern

Der komplexe Einfluss des Echtzeitrechnungssystems



d^{cpu} Auch bei konstantem Rechenaufwand zur Stellwertbestimmung variabel

- Verdrängende Einplanung
- Überlappende Ein-/Ausgabe
- Programmunterbrechungen
- Busüberlastung, DMA

Δd^{cpu} Fügt Unschärfe zum Zeitpunkt der Lagebestimmung hinzu

- Bewirkt zusätzlichen Fehler
- Beeinträchtigt die Dienstgüte



Unbekannte variable Verzögerungen (engl. *jitter*) schwer kompensierbar

- Bekannte konstante Verzögerungen schon $\leadsto d^{dead}$
- Randbedingung: $\Delta d^{cpu} \ll d^{cpu}$



Physikalisches Objekt $\leftrightarrow$ Echtzeitrechensystem



Zeitverzögerung des Regelkreises: **Totzeit** (engl. *dead time*)

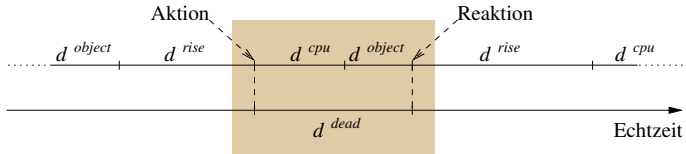
- Entsteht aus dem Zusammenspiel zwischen **Objekt** und **Rechensystem**

d^{dead}

Zeitintervall zwischen Berechnungsbeginn und Wahrnehmung einer Reaktion nach erfolgter Steuerung

- setzt sich zusammen aus d^{cpu} und d^{object} :

- 1 Implementierung des kontrollierenden Rechensystems
- 2 Dynamik des kontrollierten Objektes



Auswirkung Güte und **Stabilität** der Regelung

- Insbesondere bei hoher Varianz von $\Delta d^{dead} \mapsto$ Jitter
- Relative Ungewissheit über die erzielte Wirkung



1 Physikalisches System und Echtzeitanwendung

- Kontrolliertes Objekt
- Zusammenspiel

2 Echtzeitrechensystem

- Grundlagen: Programmunterbrechungen
- Ausnahmebehandlung
- Zustandssicherung
- Ableitung des Zeitbedarfs

3 Zusammenfassung



- 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





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 $\mapsto$ **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 $\mapsto$ **asynchron, unvorhersagbar, nicht reproduzierbar**

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



Programmunterbrechung/-verzögerung ist **nicht deterministisch**



- **Ereignisse**, oftmals unerwünscht aber nicht immer eintretend:
 - Signale von der Peripherie (z.B. E/A, Zeitgeber oder „Wachhund“)
 - Wechsel der Schutzdomäne (z.B. Systemaufruf)
 - Programmierfehler (z.B. ungültige Adresse)
 - unerfüllbare Speicheranforderung (z.B. bei Rekursion)
 - Einlagerung auf Anforderung (z.B. beim Seitenfehler)
 - Warnsignale von der Hardware (z.B. Energiemangel)
- **Ereignisbehandlung**, die problemspezifisch zu gewährleisten ist:
 - Ausnahme während der „normalen“ Programmausführung





Programmunterbrechungen implizieren **nicht-lokale Sprünge**:

- vom $\left\{ \begin{array}{c} \text{unterbrochenen} \\ \text{behandelnden} \end{array} \right\}$ zum $\left\{ \begin{array}{c} \text{behandelnden} \\ \text{unterbrochenen} \end{array} \right\}$ Programm



Sprünge (und Rückkehr davon) ziehen **Kontextwechsel** nach sich:

- Maßnahmen zur Zustandssicherung/-wiederherstellung erforderlich
- Mechanismen dazu liefern das behandelnde Programm selbst
 - bzw. eine tiefer liegende Systemebene (Betriebssystem, CPU)



Prozessorstatus unterbrochener Programme muss invariant sein



Hardware (CPU) sichert einen Zustand minimaler Größe¹

- Statusregister (SR)
- Befehlszeiger (engl. *program counter*, PC)

Software (Betriebssystem/Kompilierer) sichert den Rest

- alle $\left\{ \begin{array}{l} \text{dann noch ungesicherten} \\ \text{flüchtigen} \\ \text{im weiteren Verlauf verwendeten} \end{array} \right\}$ CPU-Register



Abhängig von der CPU werden wenige bis sehr viele Daten(bytes) bewegt
→ **Zeitbedarf!**

¹Möglicherweise aber auch den kompletten Registersatz.



- Sichern aller ungesicherten Register auf Befehlssatz-Ebene:

Zeile

```
1:  train:
2:      pushal
3:      call handler
4:      popal
5:      iret
```

x86

m68k

```
train:
    moveml d0-d7/a0-a6,a7@-
    jsr handler
    moveml a7@+,d0-d7/a0-a6
    rte
```

- train (trap/interrupt):
 - Arbeitsregisterinhalte im RAM sichern (2) und wiederherstellen (4)
 - Unterbrechungsbehandlung durchführen (3)
 - Ausführung des unterbrochenen Programms wieder aufnehmen (5)



- Kontextsicherung durch Instrumentierung des Compilers:

gcc

```
void __attribute__((interrupt)) train () {  
    handler();  
}
```

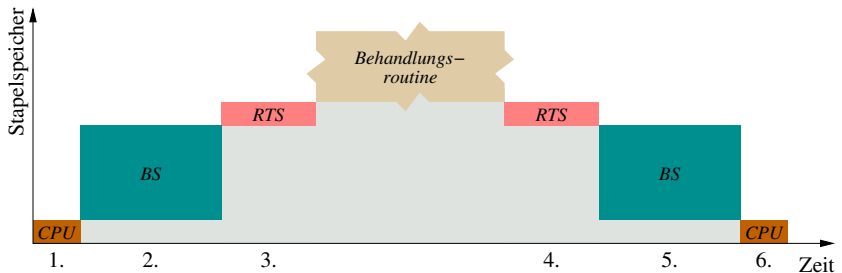
- `__attribute__((interrupt))`

- Generierung der speziellen Maschinenbefehle durch den **Kompilierer**
 - Sicherung/Wiederherstellung der Arbeitsregisterinhalte
 - Wiederaufnahme der Programmausführung
- Nicht jeder „Prozessor“ (für C/C++) implementiert dieses Attribut



- **Latenz** bis zum Start der Unterbrechungsbehandlung:
 - 1 Annahme der Unterbrechung durch die Hardware
 - 2 Sicherung der Inhalte der (flüchtigen) CPU-Register
 - 3 Aufbau des Aktivierungsblocks der Behandlungsprozedur
 - **Latenz** bis zur Fortführung des unterbrochenen Programms:
 - 4 Abbau des Aktivierungsblocks der Behandlungsprozedur
 - 5 Wiederherstellung der Inhalte der (flüchtigen) CPU-Register
 - 6 Beendigung der Unterbrechung
- ⚠ **Zeitpunkte** und **Häufigkeit** der Gemeinkosten sind i. A. unbestimmbar





Werte mit fester oberer Schranke sind gefordert:

- Prozessor respektive Rechensystem (z.B. ADCs)
- Echtzeitbetriebssystem (engl. *real-time operating system*, RTOS)
- Echtzeitanwendung (Behandlungsroutine)





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 μ s @ 10 Bit [2]
- d^{irq} Infineon TriCore Arbitrierung: 5 - 11 Takte @ 150 MHz [2]
- d^{OS} CiAO OS Fadenwechsel: ≤ 219 Takte @ TriCore (50 MHz) [5]



Alleine die **Anwendung** kann (fast) komplett kontrolliert werden.²

²Lässt man zugeliferte Bibliotheksfunktionen oder zugekaufte Codegeneratoren außer Acht.



- 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

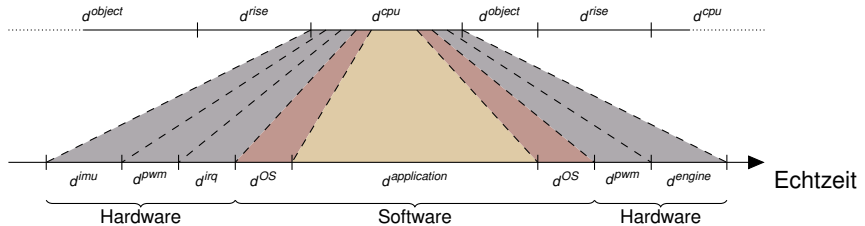


The Big Picture – Rechenzeitbedarf

Aus welchen Komponenten setzt sich d^{cpu} zusammen?



Ein Echtzeitsystem setzt sich aus verschiedenen Hardware, Sensoren, Peripherie-Elementen, Echtzeitbetriebssystem und Softwarekomponenten zusammen.



Alle Komponenten müssen bedacht werden!

Sensoren/Aktoren Abtastrate ($\sim d^{imu}$), Motorleistung ($\sim d^{engine}$)

Mikrocontroller Signalverarbeitung ($\sim d^{pwm}$), IRQ ($\sim d^{irq}$)

Betriebssystem Unterbrechungslatenz, Kontextwechsel ($\sim d^{OS}$)

Anwendung Steuerung, Regelung ($\sim d^{application}$)



1 Physikalisches System und Echtzeitanwendung

- Kontrolliertes Objekt
- Zusammenspiel

2 Echtzeitrechensystem

- Grundlagen: Programmunterbrechungen
- Ausnahmebehandlung
- Zustandssicherung
- Ableitung des Zeitbedarfs

3 Zusammenfassung



Zusammenspiel Kontrolliertes Objekt $\leftrightarrow$ Kontrollierendes Rechensystem

- Die **Objektdynamik** definiert den zeitlichen Rahmen durch Termine
- Die Echtzeitanwendung muss diese Termine einhalten
- Ihr Anteil am kontrollierenden Rechensystem ist eher gering

Programmunterbrechung in synchroner oder asynchroner Ausprägung

- Beeinflussen den Ablauf der Echtzeitanwendung
- Zustandssicherung, Verwaltungsgemeinkosten des schlimmsten Falls



- [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] Kopetz, H. :
Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications.
Kluwer Academic Publishers, 1997. –
ISBN 0-7923-9894-7
- [4] Lohmann, D. :
Vorlesung: Betriebssysteme, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
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



Typographische Konvention

Der erste Index gibt die Aufgabe an (z.B. D_i), der Zweite (optional) bezieht sich auf den Arbeitsauftrag (z.B. $d_{i,j}$). Exponenten zeigen verschiedene Varianten einer Eigenschaft an (z.B. T^{HI}, T^{MED}, T^{LO}). Funktionen beschreiben zeitlich variierende Eigenschaften (z.B. $P(t)$).

Eigenschaften

- t (Real-)Zeit
- d Zeitverzögerung (engl. delay)

