Echtzeitsysteme

Physikalisches System ⟷ Kontrollierendes Rechensystem

Peter Ulbrich

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

`https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS19/V_EZS/`

21. Oktober 2019

Fragestellungen

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

- Die funktionale Korrektheit ist nicht ausreichend

→ Zeitliche (temporale) Korrektheit!

Fragestellungen

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/19 ff)

→ Bestimmt durch die Kopplung an die (reale) Umwelt

Fragestellungen

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/19 ff)

→ Bestimmt durch die Kopplung an die (reale) Umwelt

Geschwindigkeit ist keine Garantie

- Komplexität des Echtzeitrechensystems

→ Entscheidend ist das tatsächliche Laufzeitverhalten

Fragestellungen

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/19 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?

Exkurs: Funktionale und nicht-funktionale Eigenschaften

- Funktionale Eigenschaften
  - Werden direkt implementiert

Eine Funktion

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

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 $\rightsquigarrow$ erst im konkreten Kontext bestimmt

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 $\rightsquigarrow$ 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?!

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 $\rightsquigarrow$ erst im konkreten Kontext bestimmt

Zeit aus Sicht des Softwareengineering nicht-funktional

- Führt häufig zu Verwirrung im Kontext von Echtzeitsystemen

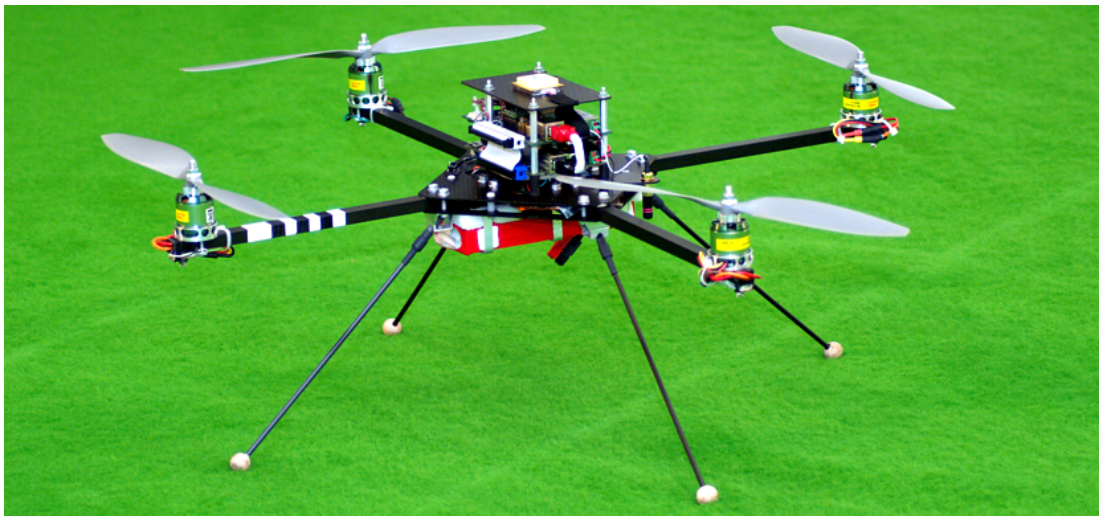
$\rightarrow$ Die rechtzeitige Auslösung des Airbags ist funktional?!

Es kommt auf die Betrachtungsebene an!

Gliederung

Aufbau des Demonstrators

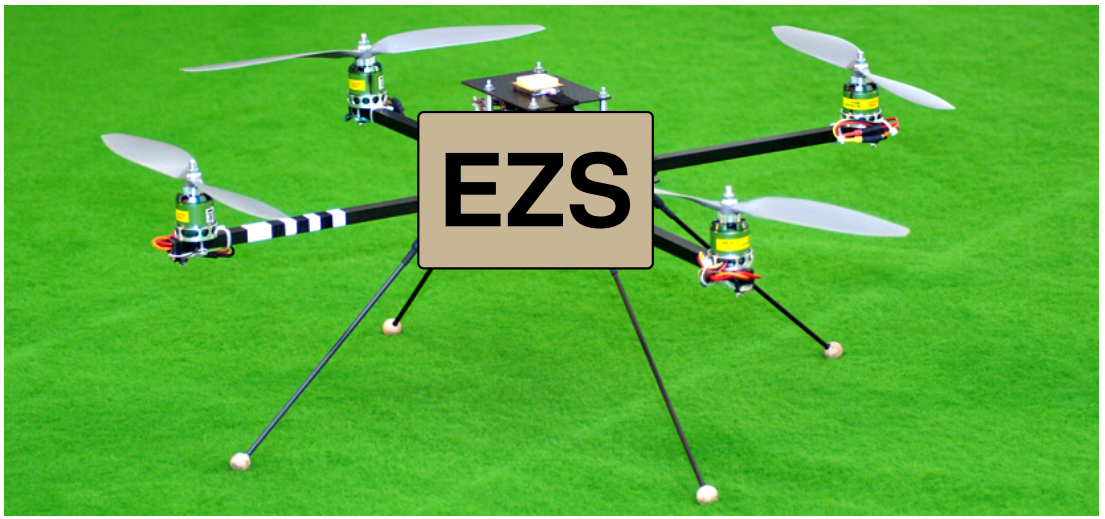
Eine elementare Kontrollschleife: Die Fluglageregelung



⚠ Quadrokopter sind inhärent instabil $\rightsquigarrow$ ständige, aktive Kontrolle

Aufbau des Demonstrators

Eine elementare Kontrollschleife: Die Fluglageregelung

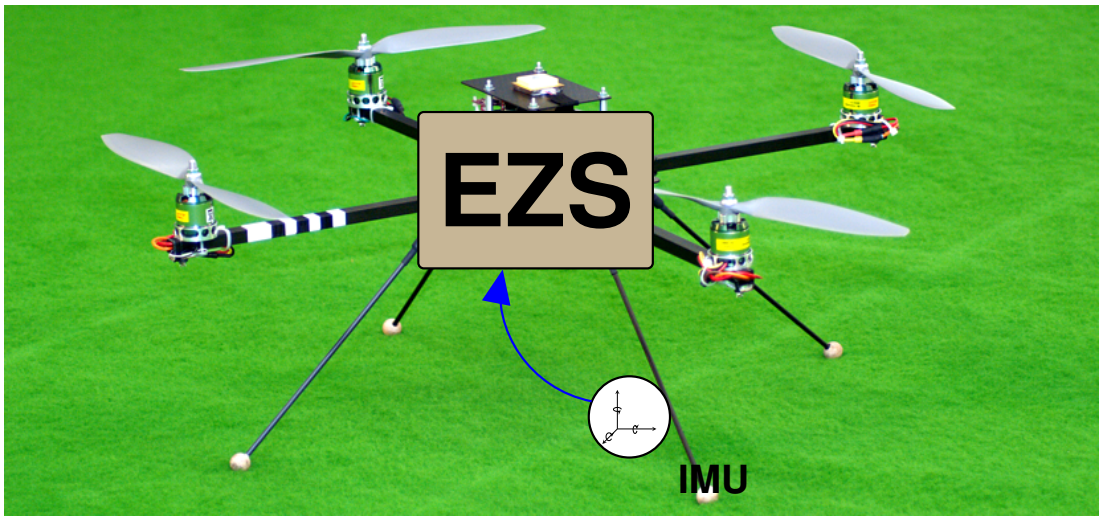


⚠ Quadrokopter sind inhärent instabil $\rightsquigarrow$ ständige, aktive Kontrolle

- Aufgabe des Echtzeitsystems: Fluglageregelung (Stabilisierung)

Aufbau des Demonstrators

Eine elementare Kontrollschleife: Die Fluglageregelung

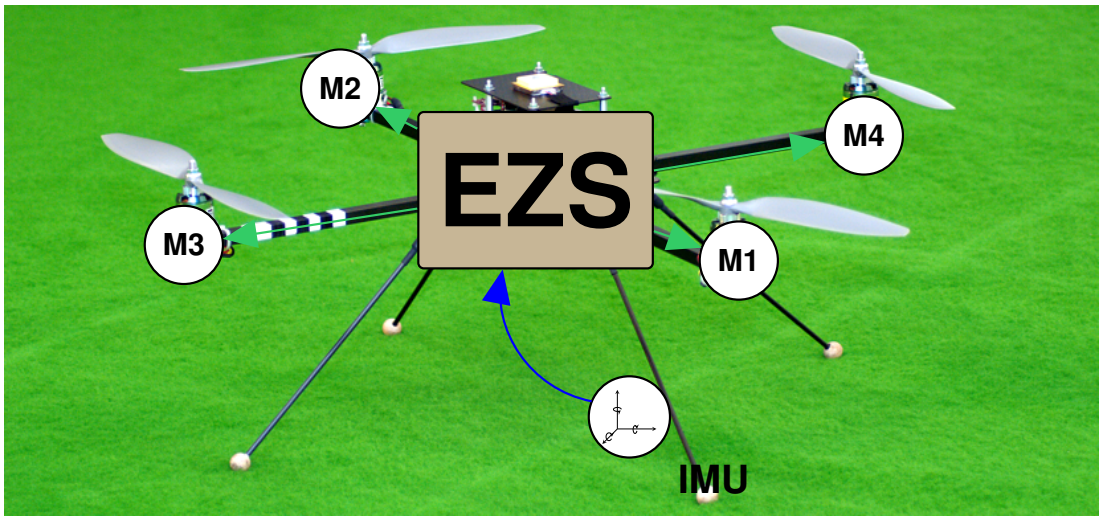


⚠ Quadrokopter sind inhärent instabil $\rightsquigarrow$ ständige, aktive Kontrolle

- Aufgabe des Echtzeitsystems: Fluglageregelung (Stabilisierung)
  - Bewegung im Raum bestimmen (engl. ***i**nertial **m**easurement **u**nit*)

Aufbau des Demonstrators

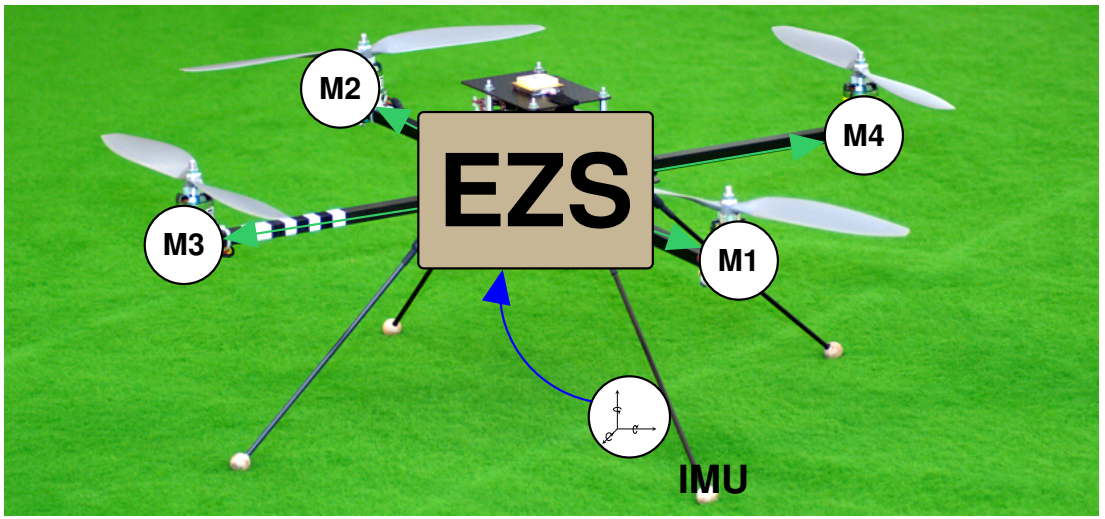
Eine elementare Kontrollschleife: Die Fluglageregelung



⚠ Quadrokopter sind inhärent instabil $\rightsquigarrow$ ständige, aktive Kontrolle

- Aufgabe des Echtzeitsystems: Fluglageregelung (Stabilisierung)
  - Bewegung im Raum bestimmen (engl. ***i**nertial **m**easurement **u**nit*)
  - Vorgabe der Motor- und damit der Rotordrehzahl

Aufbau des Demonstrators



⚠ Quadrokopter sind inhärent instabil $\rightsquigarrow$ ständige, aktive Kontrolle

- Aufgabe des Echtzeitsystems: Fluglageregelung (Stabilisierung)
  - Bewegung im Raum bestimmen (engl. ***i**nertial **m**easurement **u**nit*)
  - Vorgabe der Motor- und damit der Rotordrehzahl

☞ Physikalisches Objekt, Echtzeit-Anwendung und -Rechensystem

Kontrolle und Regelung des physikalischen Objekts

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

Kontrolle und Regelung des physikalischen Objekts

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

Wie lange dauert es bis zum Gleichgewicht?

- Gewicht, Leistungsfähigkeit der Motoren, Bauart der Rotorblätter, . . .

→ Objektdynamik und -physik

Kontrolle und Regelung des physikalischen Objekts

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

⚠ Wie lange dauert es bis zum Gleichgewicht?

- Gewicht, Leistungsfähigkeit der Motoren, Bauart der Rotorblätter, . . .

→ Objektdynamik und -physik

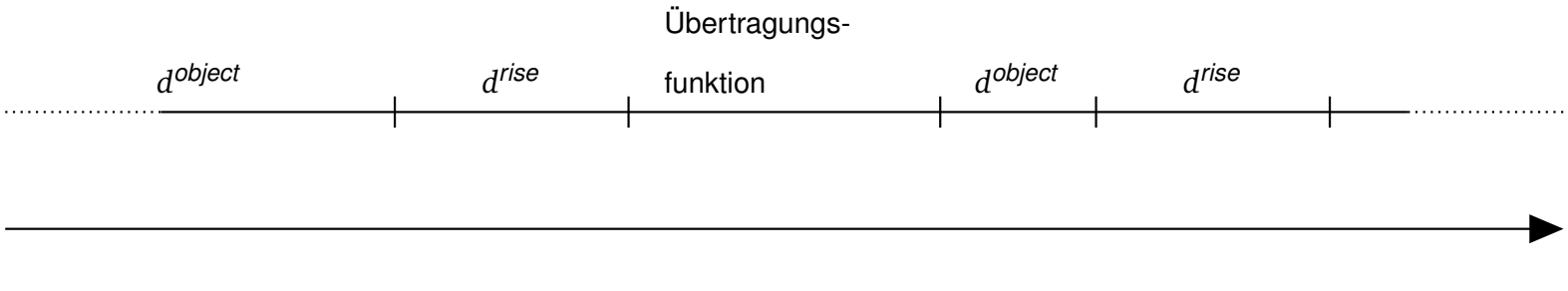
☞ Dies ist die Welt der Steuerungs- und Regelungsanwendungen

- Regelungstechnische Abstraktion des Quadrokopters: 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

Zeitparameter des physikalischen Objekts

Die Physik kommt ins Spiel . . . [3, Kapitel 1.3]



☞ Zeitverzögerung (d, delay) des Quadrokopters:

d^{object} Zeitdauer bis zum Beginn der Lageänderung

- Hervorgerufen durch die (initiale) Trägheit des Objektes

→ Prozessverzögerung (engl. *process/object delay*)

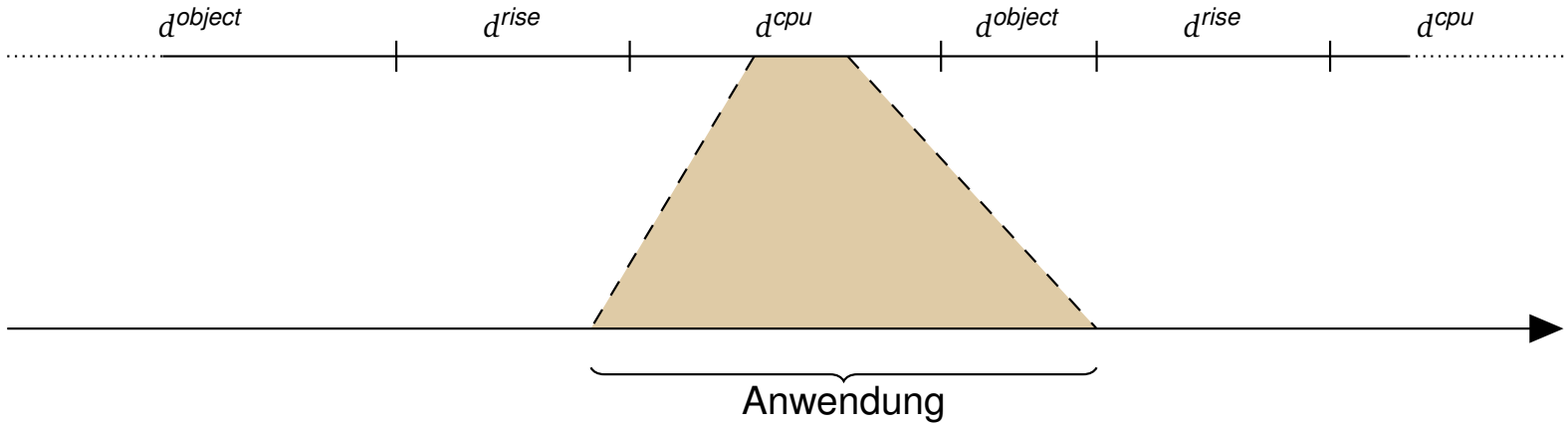
d^{rise} Zeitdauer bis zum (erneuten) Gleichgewicht

- 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)

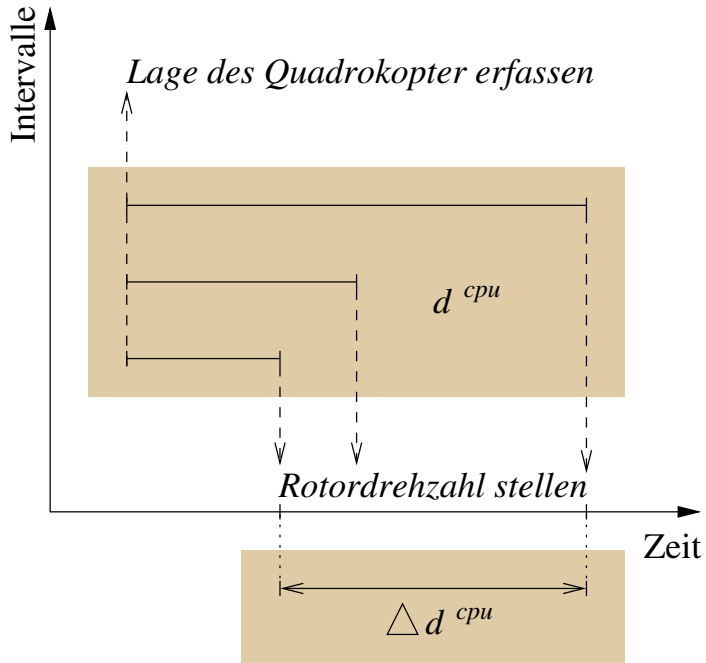
⚠ Das Rechensystem benötigt Zeit für die Berechnung

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

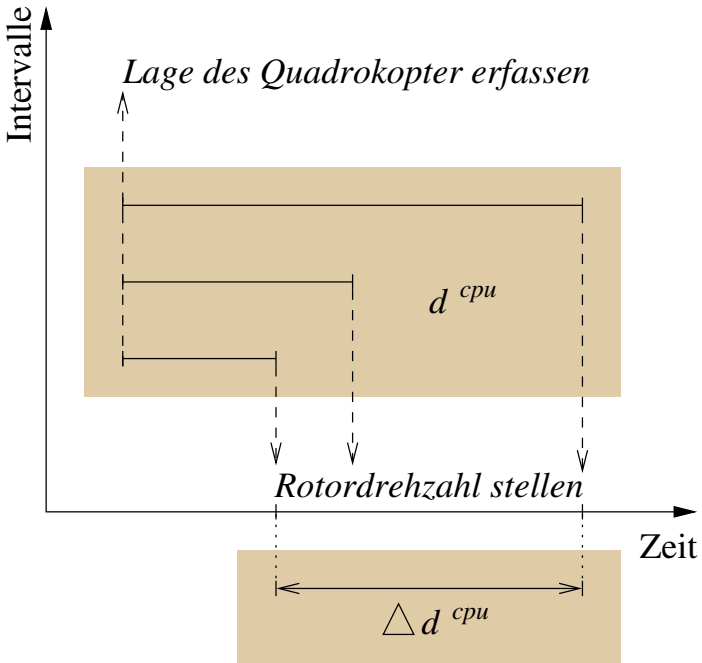
- Erfassung der Umgebung durch Sensoren
- Berechnung des Regelungsalgorithmus
- Kontrollieren des Objekts durch Aktorik

Schwankungen (engl. *jitter*) in den Zeitparametern

Der komplexe Einfluss des Echtzeitrechensystems



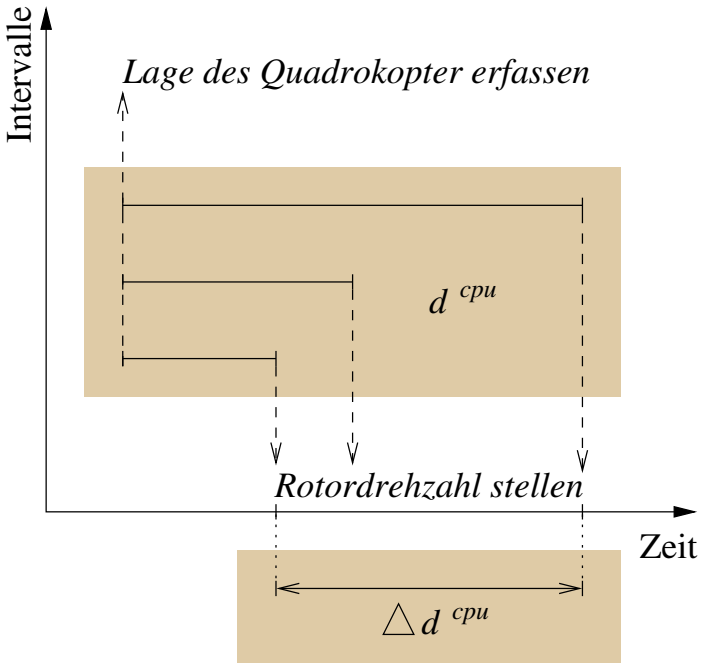
Schwankungen (engl. *jitter*) in den Zeitparametern



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

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

Schwankungen (engl. *jitter*) in den Zeitparametern



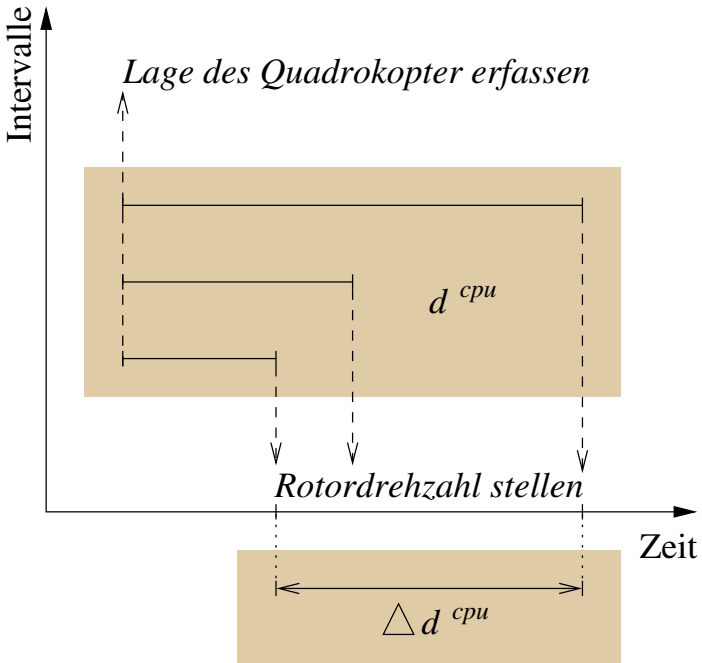
d^{cpu} Auch bei konstantem Rechenaufwand zur Stellwertbestimmung variabel

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

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

- Bewirkt zusätzlichen Fehler
- Beeinträchtigt die Dienstgüte

Schwankungen (engl. *jitter*) in den Zeitparametern



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 $\rightsquigarrow d^{dead}$
- Randbedingung: $\Delta d^{cpu} \ll d^{cpu}$

Physikalisches Objekt ⟷ 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

Physikalisches Objekt ⟷ Echtzeitrechensystem

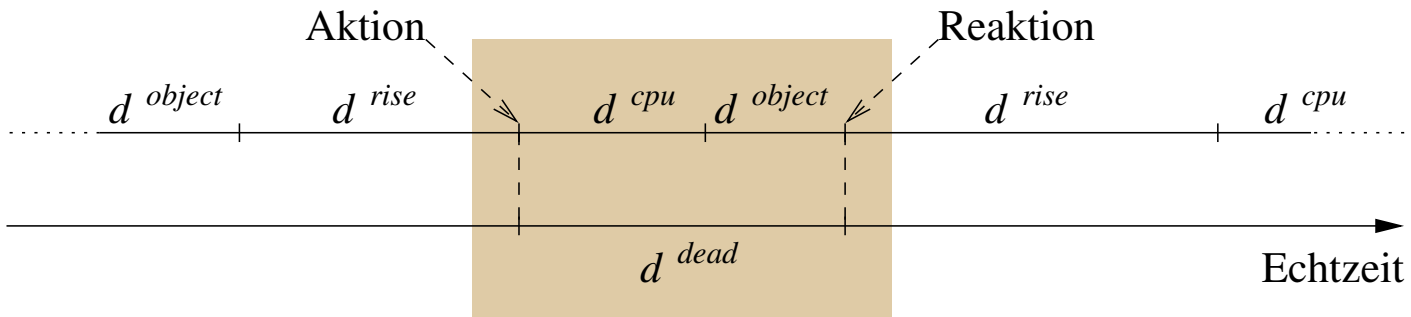
☞ Zeitverzögerung des Regelkreises: Totzeit (engl. *dead time*)

- 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



Physikalisches Objekt ⟷ Echtzeitrechensystem

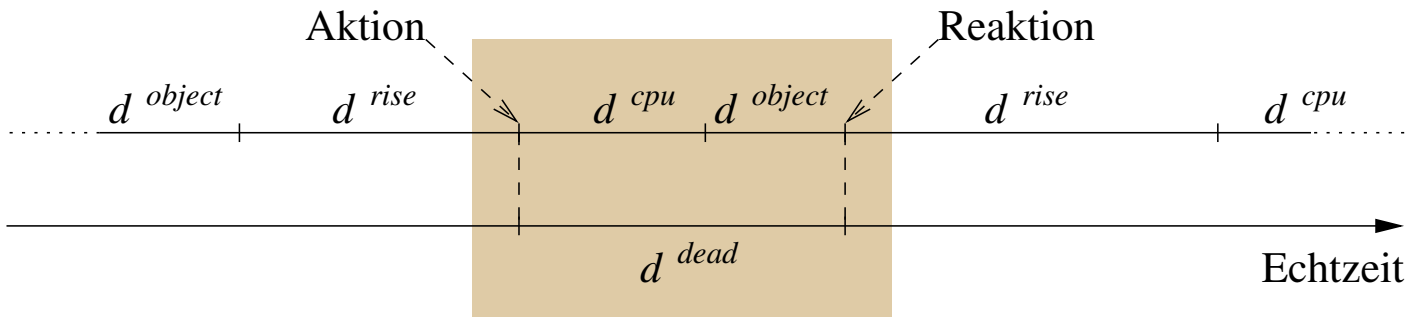
☞ Zeitverzögerung des Regelkreises: Totzeit (engl. *dead time*)

- 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 Δd^{dead} ↦ Jitter

→ Relative Ungewissheit über die erzielte Wirkung

Gliederung

Zeitliches Verhalten von Echtzeitanwendungen

- 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?

Zeitliches Verhalten von Echtzeitanwendungen

- 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

Zeitliches Verhalten von Echtzeitanwendungen

- 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

Unterbrechungsarten

Zwei Arten von Programmunterbrechungen:

synchron die „Falle“ (engl. *trap*)

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

Unterbrechungsarten

Zwei Arten von Programmunterbrechungen:

synchron die „Falle“ (engl. *trap*)

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

- Unterschiede ergeben sich hinsichtlich:
  - Quelle
  - Synchronität
  - Vorhersagbarkeit
  - Reproduzierbarbeit

Unterbrechungsarten

Zwei Arten von Programmunterbrechungen:

synchron die „Falle“ (engl. *trap*)

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

- Unterschiede ergeben sich hinsichtlich:
  - Quelle
  - Synchronität
  - Vorhersagbarkeit
  - Reproduzierbarbeit

Behandlung ist zwingend und grundsätzlich prozessorabhängig

Unterbrechungsarten

Zwei Arten von Programmunterbrechungen:

synchron die „Falle“ (engl. *trap*)

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

- Unterschiede ergeben sich hinsichtlich:
  - Quelle
  - Synchronität
  - Vorhersagbarkeit
  - Reproduzierbarbeit

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 $\mapsto$ 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

$\rightarrow$ 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

Ausnahmesituationen (engl. *exception*) – Beispiele

- 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)

Ausnahmesituationen (engl. *exception*) – Beispiele

- 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

Ausnahmebehandlung (engl. *exception handling*)

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

Ausnahmebehandlung (engl. *exception handling*)

Programmunterbrechungen implizieren nicht-lokale Sprünge:

- vom { unterbrochenen / behandelnden } zum { behandelnden / unterbrochenen } 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)

Ausnahmebehandlung (engl. *exception handling*)

Programmunterbrechungen implizieren nicht-lokale Sprünge:

- vom { unterbrochenen / behandelnden } zum { behandelnden / unterbrochenen } 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

Zustandssicherung

Hardware (CPU) sichert einen Zustand minimaler Größe[1]

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

[1] Möglicherweise aber auch den kompletten Registersatz.

Zustandssicherung

Hardware (CPU) sichert einen Zustand minimaler Größe[1]

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

Software (Betriebssystem/Kompilierer) sichert den Rest

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

[1] Möglicherweise aber auch den kompletten Registersatz.

Zustandssicherung

Hardware (CPU) sichert einen Zustand minimaler Größe[1]

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

Software (Betriebssystem/Kompilierer) sichert den Rest

- alle { dann noch ungesicherten / flüchtigen / im weiteren Verlauf verwendeten } CPU-Register

Abhängig von der CPU werden wenige bis sehr viele Daten(bytes) bewegt

$\rightsquigarrow$ Zeitbedarf!

[1] Möglicherweise aber auch den kompletten Registersatz.

Prozessorstatus sichern und wiederherstellen

- Sichern aller ungesicherten Register auf Befehlssatz-Ebene:

Zeile	x86
1:	`train:`
2:	`  pushal`
3:	`  call handler`
4:	`  popal`
5:	`  iret`

Prozessorstatus sichern und wiederherstellen

- Sichern aller ungesicherten Register auf Befehlssatz-Ebene:

Zeile	x86	m68k
1:	`train:`	`train:`
2:	`  pushal`	`  moveml d0-d7/a0-a6,a7@-`
3:	`  call handler`	`  jsr handler`
4:	`  popal`	`  moveml a7@+,d0-d7/a0-a6`
5:	`  iret`	`  rte`

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

Prozessorstatus sichern und wiederherstellen (Forts.)

- 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

Verwaltungsgemeinkosten des schlimmsten Falls

(engl. ***w**orst-**c**ase **a**dministrative **o**verhead*, WCAO)

- 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

Verwaltungsgemeinkosten des schlimmsten Falls

(engl. ***w**orst-**c**ase **a**dministrative **o**verhead*, WCAO)

- 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

Verwaltungsgemeinkosten des schlimmsten Falls

(engl. ***w**orst-**c**ase **a**dministrative **o**verhead*, WCAO)

- 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

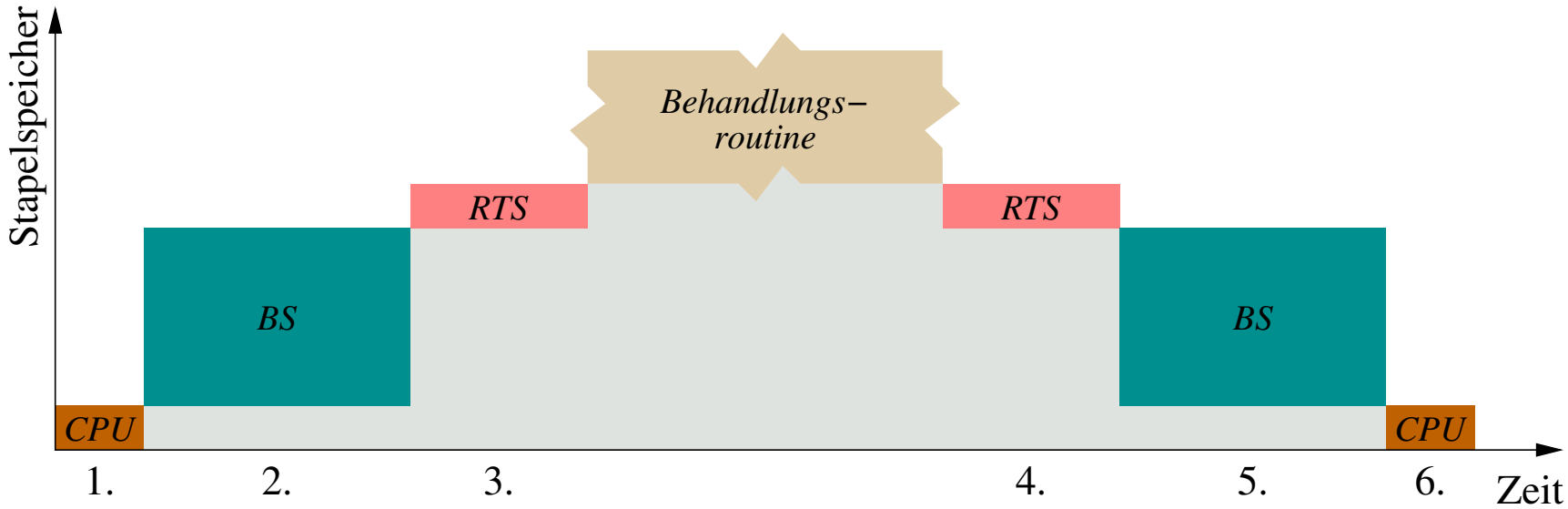
- Latenz bis zur Fortführung des unterbrochenen Programms:

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

Verwaltungsgemeinkosten des schlimmsten Falls (Forts.)

Speicherplatz vs. Laufzeit



⚠ Werte mit fester oberer Schranke sind gefordert:

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

Zeitbedarf im Echtzeitrechensystem

Welche Komponenten benötigen wie viel Zeit?

Häufig ist eine eigenständige Beurteilung des Zeitbedarfs nicht möglich,

Herstellerangaben ermöglichen die Abschätzung des schlimmsten Falls.

[2] Lässt man zugelieferte Bibliotheksfunktionen oder zugekaufte Codegeneratoren außer Acht.

Zeitbedarf im Echtzeitrechensystem

Welche Komponenten benötigen wie viel Zeit?

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 [1]
d^{adc} Infineon TriCore ADC: 280 ns – 2,5 μs @ 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]

[2] Lässt man zugelieferte Bibliotheksfunktionen oder zugekaufte Codegeneratoren außer Acht.

Zeitbedarf im Echtzeitrechensystem

Welche Komponenten benötigen wie viel Zeit?

⚠ 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 [1]
  - d^{adc} Infineon TriCore ADC: 280 ns – 2,5 μs @ 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.[2]

[2] Lässt man zugelieferte Bibliotheksfunktionen oder zugekaufte Codegeneratoren außer Acht.

Abbildung der Fluglageregelung

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

Abbildung der Fluglageregelung

- Die Lage des Quadrokopter 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

Abbildung der Fluglageregelung

- Die Lage des Quadrokopter 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 $1/d^{sample}$

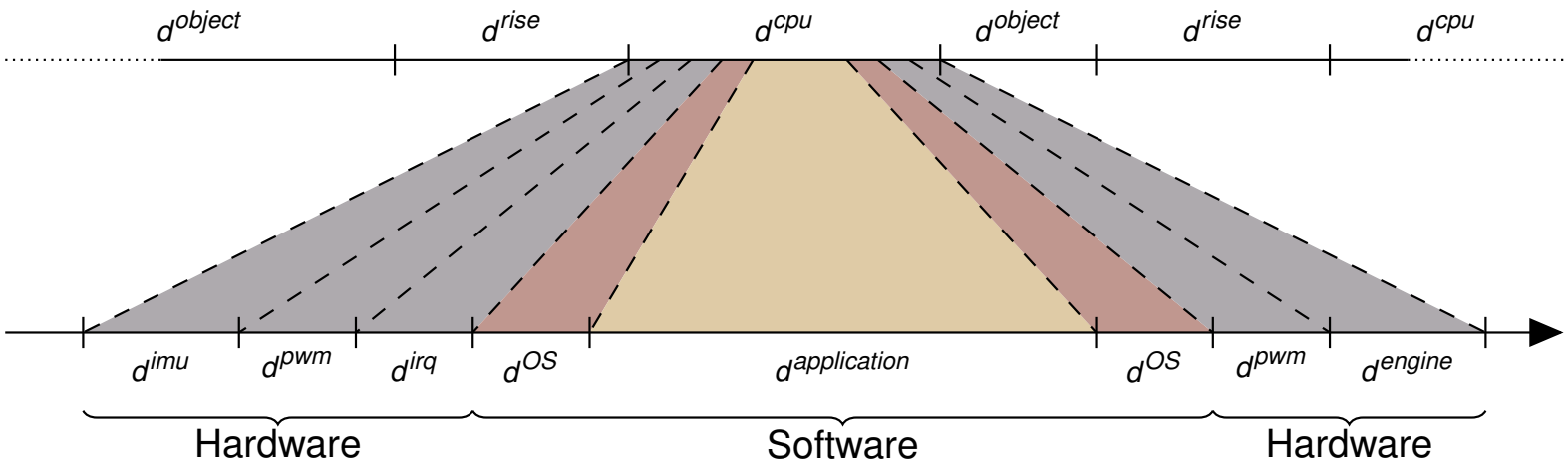
- Analoge auf digitale Werte abbilden $\leadsto$ A/D-Wandlung

→ 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 ($\rightsquigarrow d^{imu}$), Motorleistung ($\rightsquigarrow d^{engine}$)
Mikrocontroller	Signalverarbeitung ($\rightsquigarrow d^{pwm}$), IRQ ($\rightsquigarrow d^{irq}$)
Betriebssystem	Unterbrechungslatenz, Kontextwechsel ($\rightsquigarrow d^{OS}$)
Anwendung	Steuerung, Regelung ($\rightsquigarrow d^{application}$)

Gliederung

Resümee

Zusammenspiel Kontrolliertes Objekt ⟷ Kontrollierendes Rechensystem

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

Resümee

Zusammenspiel Kontrolliertes Objekt ⟷ 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

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] Kopetz, H. :
Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications.
First Edition.
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

Literaturverzeichnis (Forts.)

EZS – Cheat Sheet

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)