Echtzeitsysteme

Physikalisches Objekt $\leftrightarrow$ Kontrollierendes Rechensystem

Peter Ulbrich

Lehrstuhl Informatik 4

14. Oktober 2014

Gliederung

Fragestellungen

Fragestellungen

- Welche Berührungspunkte gibt es zwischen dem physikalischen Objekt und dem kontrollierenden Echtzeitsystem?
  - Woher stammen die Terminvorgaben für das Echtzeitrechensystem?

Fragestellungen

- Welche Berührungspunkte gibt es zwischen dem physikalischen Objekt und dem kontrollierenden Echtzeitsystem?
  - Woher stammen die Terminvorgaben für das Echtzeitrechensystem?
- Welche Rolle spielt überhaupt die Echtzeitanwendung?
  - Wie ist sie in das Echtzeitrechensystem eingepasst?
  - Welche Elemente gehören noch zum kontrollierenden Rechensystem?

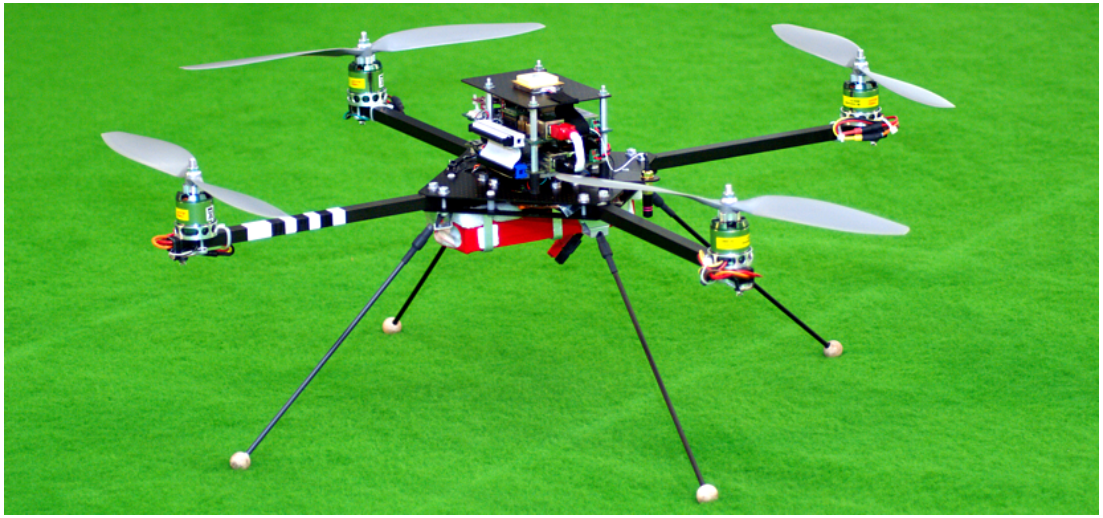
Fragestellungen

- Welche Berührungspunkte gibt es zwischen dem physikalischen Objekt und dem kontrollierenden Echtzeitsystem?
  - Woher stammen die Terminvorgaben für das Echtzeitrechensystem?
- Welche Rolle spielt überhaupt die Echtzeitanwendung?
  - Wie ist sie in das Echtzeitrechensystem eingepasst?
  - Welche Elemente gehören noch zum kontrollierenden Rechensystem?
- Was beeinflusst das Laufzeitverhalten der Echtzeitanwendung?
  - Was muss man für die Beurteilung der Rechtzeitigkeit betrachten?
  - Welche Rolle spielen beispielsweise Unterbrechungen?
  - Wie hoch sind die Verwaltungsgemeinkosten von Unterbrechungen?

Gliederung

Aufbau des Demonstrators

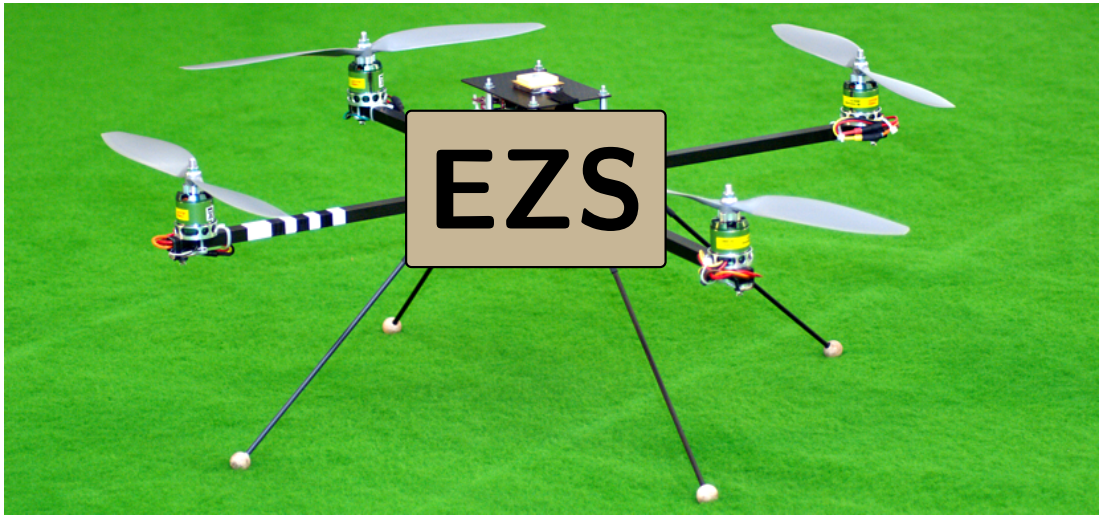
Eine elementare Kontrollschleife: Die Fluglageregelung



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

Aufbau des Demonstrators

Eine elementare Kontrollschleife: Die Fluglageregelung

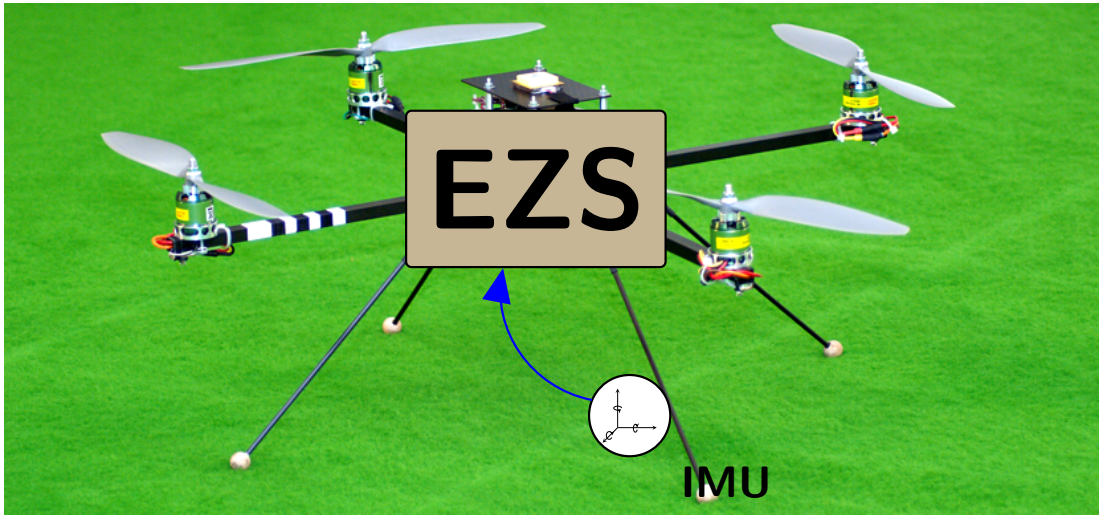


Quadrokopter sind inhärent instabil $\rightsquigarrow$ ständige, aktive Kontrolle

Aufgabe des Echtzeitrechensystems: Fluglageregelung (Stabilisierung)

Aufbau des Demonstrators

Eine elementare Kontrollschleife: Die Fluglageregelung

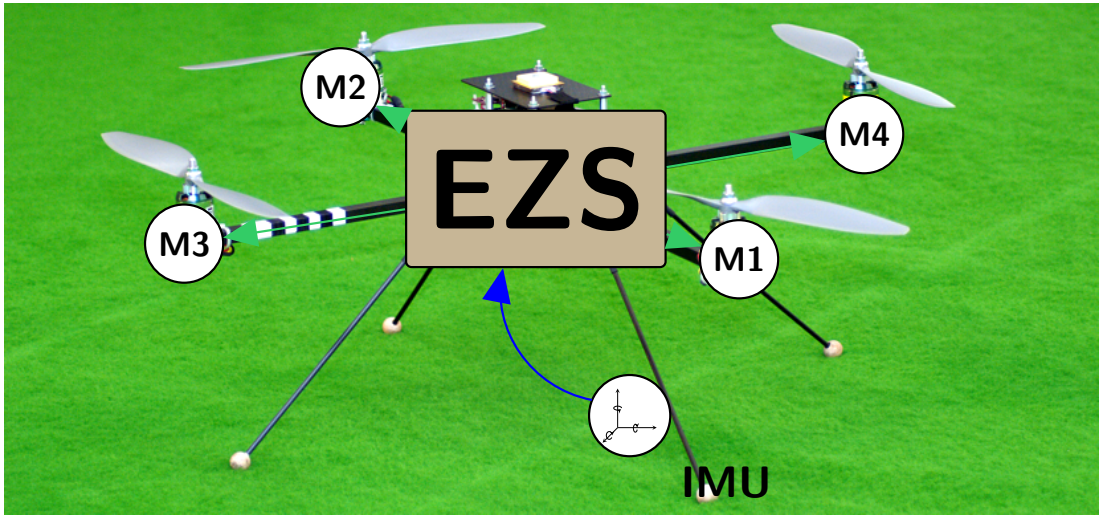


Quadrokopter sind inhärent instabil $\rightsquigarrow$ ständige, aktive Kontrolle
Aufgabe des Echtzeitrechensystems: Fluglageregelung (Stabilisierung)

- Bewegung im Raum bestimmen (engl. ***i****nertial* ***m****easurement* ***u****nit*)

Aufbau des Demonstrators

Eine elementare Kontrollschleife: Die Fluglageregelung

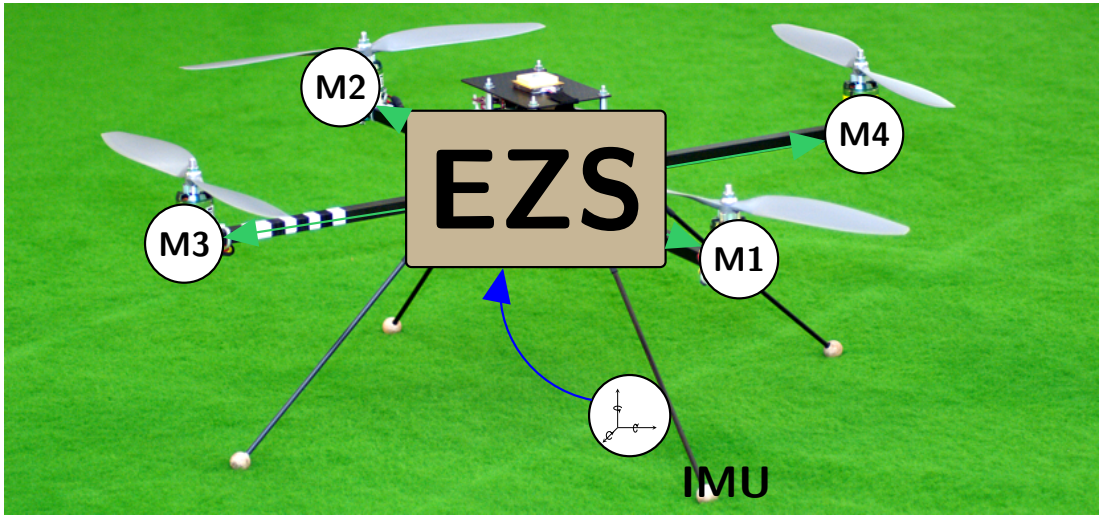


Quadrokopter sind inhärent instabil $\rightsquigarrow$ ständige, aktive Kontrolle
Aufgabe des Echtzeitrechensystems: Fluglageregelung (Stabilisierung)

- Bewegung im Raum bestimmen (engl. **i***nertial* **m***easurement* **u***nit*)
- Vorgabe der Motor- und damit der Rotordrehzahl

Aufbau des Demonstrators

Eine elementare Kontrollschleife: Die Fluglageregelung



Quadrokopter sind inhärent instabil $\rightsquigarrow$ ständige, aktive Kontrolle
Aufgabe des Echtzeitrechensystems: Fluglageregelung (Stabilisierung)

- Bewegung im Raum bestimmen (engl. **i***nertial* **m***easurement* **u***nit*)
- Vorgabe der Motor- und damit der Rotordrehzahl

$\rightsquigarrow$ Setzt sich zusammen aus: Objekt, Rechensystem, Anwendung

Kontrolliertes Objekt

Schrittfunktion (engl. *step function*) und Antwortfunktion (engl. *response function*)

Die Schrittfunktion verändert den Zustand des kontrollierten Objekts, die Zustandsänderung wird durch die Antwortfunktion beschrieben.

Kontrolliertes Objekt

Schrittfunktion (engl. *step function*) und Antwortfunktion (engl. *response function*)

Die Schrittfunktion verändert den Zustand des kontrollierten Objekts, die Zustandsänderung wird durch die Antwortfunktion beschrieben.

Eine Änderung der Rotordrehzahl des Quadrokopter beeinflusst dessen Lage im Raum, bis ein Gleichgewicht zwischen Sollzustand und tatsächlichem Zustand hergestellt wurde:

Kontrolliertes Objekt

Schrittfunktion (engl. *step function*) und Antwortfunktion (engl. *response function*)

Die Schrittfunktion verändert den Zustand des kontrollierten Objekts, die Zustandsänderung wird durch die Antwortfunktion beschrieben.

Eine Änderung der Rotordrehzahl des Quadrokopter beeinflusst dessen Lage im Raum, bis ein Gleichgewicht zwischen Sollzustand und tatsächlichem Zustand hergestellt wurde:

- Wie lange dauert es bis zum Gleichgewicht?

Kontrolliertes Objekt

Schrittfunktion (engl. *step function*) und Antwortfunktion (engl. *response function*)

Die Schrittfunktion verändert den Zustand des kontrollierten Objekts, die Zustandsänderung wird durch die Antwortfunktion beschrieben.

Eine Änderung der Rotordrehzahl des Quadrokopter beeinflusst dessen Lage im Raum, bis ein Gleichgewicht zwischen Sollzustand und tatsächlichem Zustand hergestellt wurde:

- Wie lange dauert es bis zum Gleichgewicht? $\rightsquigarrow$ Objektdynamik
  - Gewicht, Leistungsfähigkeit der Motoren, Bauart der Rotorblätter, ...

Kontrolliertes Objekt

Schrittfunktion (engl. *step function*) und Antwortfunktion (engl. *response function*)

Die Schrittfunktion verändert den Zustand des kontrollierten Objekts, die Zustandsänderung wird durch die Antwortfunktion beschrieben.

Eine Änderung der Rotordrehzahl des Quadrokopter beeinflusst dessen Lage im Raum, bis ein Gleichgewicht zwischen Sollzustand und tatsächlichem Zustand hergestellt wurde:

- Wie lange dauert es bis zum Gleichgewicht? $\rightsquigarrow$ Objektdynamik
  - Gewicht, Leistungsfähigkeit der Motoren, Bauart der Rotorblätter, ...

Zeitparameter zur Charakterisierung der Schritt-/Antwortfunktion:

d^{object} Zeitdauer bis sich die Lage des Quadrokopter zu ändern beginnt
- hervorgerufen durch die (initiale) Trägheit des Objektes
- auch als Prozessverzögerung (engl. *process lag*) bezeichnet

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

Kontrollierendes Rechensystem

Echtzeitrechensystem

Die Lage des Quadrokopter wird zyklisch abgetastet, um Abweichungen der aktuellen Lage von der Gleichgewichtslage zu erkennen:

d^{sample} Zeitabstand (konstant) zwischen zwei Abtastungen

- analoge auf digitale Werte abbilden $\leadsto$ A/D-Wandlung
- Faustregel: $d^{sample} < (d^{rise}/10)$
  - quasi-kontinuierliches Verhalten des diskreten Systems

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

Kontrollierendes Rechensystem

Echtzeitrechensystem

Die Lage des Quadrokopter wird zyklisch abgetastet, um Abweichungen der aktuellen Lage von der Gleichgewichtslage zu erkennen:

d^{sample} Zeitabstand (konstant) zwischen zwei Abtastungen

- analoge auf digitale Werte abbilden $\leadsto$ A/D-Wandlung
- Faustregel: $d^{sample} < (d^{rise}/10)$
  - quasi-kontinuierliches Verhalten des diskreten Systems

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

Abweichung (Ist-/Sollwert) bestimmen und dem Regelungsalgorithmus zur Berechnung des neuen Stellwertes zuführen:

Kontrollierendes Rechensystem

Echtzeitrechensystem

Die Lage des Quadrokopter wird zyklisch abgetastet, um Abweichungen der aktuellen Lage von der Gleichgewichtslage zu erkennen:

d^{sample} Zeitabstand (konstant) zwischen zwei Abtastungen

- analoge auf digitale Werte abbilden $\rightsquigarrow$ A/D-Wandlung
- Faustregel: $d^{sample} < (d^{rise}/10)$
  - quasi-kontinuierliches Verhalten des diskreten Systems

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

Abweichung (Ist-/Sollwert) bestimmen und dem Regelungsalgorithmus zur Berechnung des neuen Stellwertes zuführen:

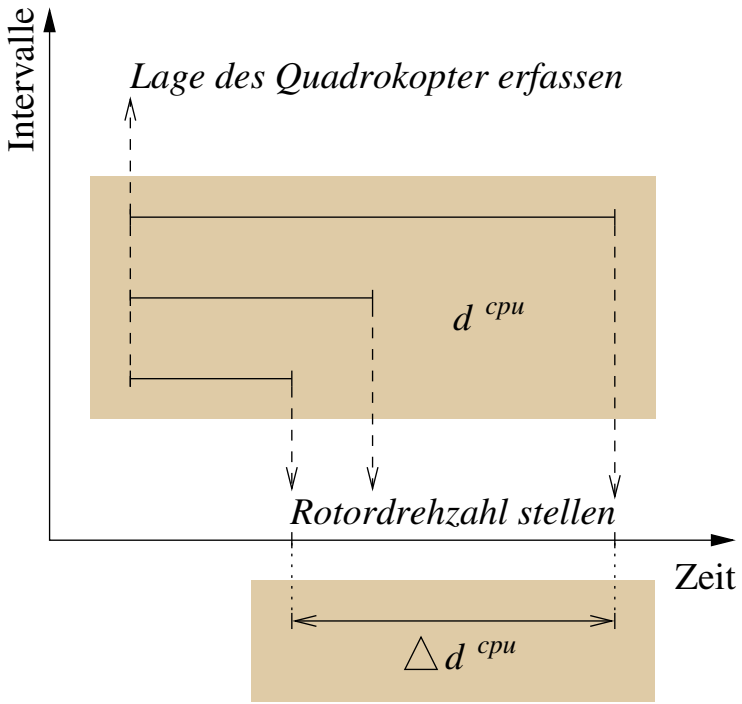
d^{cpu} Zeitdauer bis zur Ausgabe des neuen Stellwertes

- digitale auf analoge Werte abbilden $\rightsquigarrow$ D/A-Wandlung
- Randbedingung: $d^{cpu} < d^{sample}$

Δd^{cpu} Differenz zwischen Minimum und Maximum von d^{cpu}

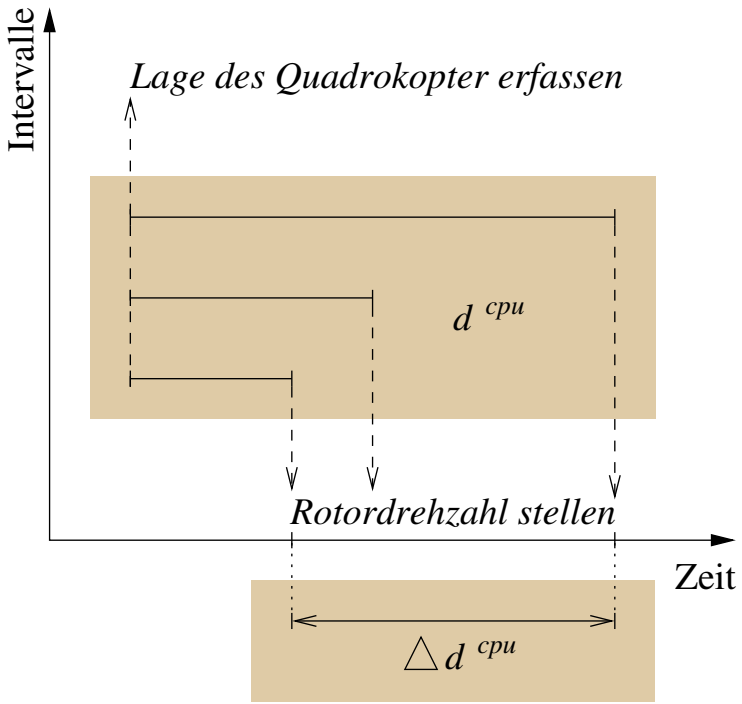
Kontrollierendes Rechensystem (Forts.)

Schwankung (engl. *jitter*) in den Messergebnissen



Kontrollierendes Rechensystem (Forts.)

Schwankung (engl. *jitter*) in den Messergebnissen

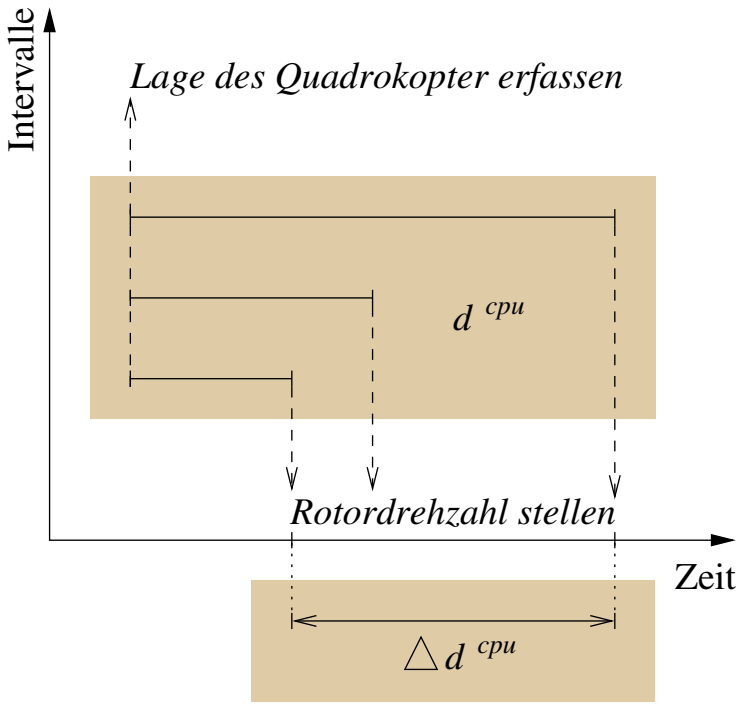


d^{cpu} ist trotz konstantem Rechenaufwand zur Stellwertbestimmung variabel

- verdrängende Einplanung
- überlappende Ein-/Ausgabe
- Programmunterbrechungen
- Busüberlastung, DMA

Kontrollierendes Rechensystem (Forts.)

Schwankung (engl. *jitter*) in den Messergebnissen



d^{cpu} ist trotz konstantem Rechenaufwand zur Stellwertbestimmung variabel

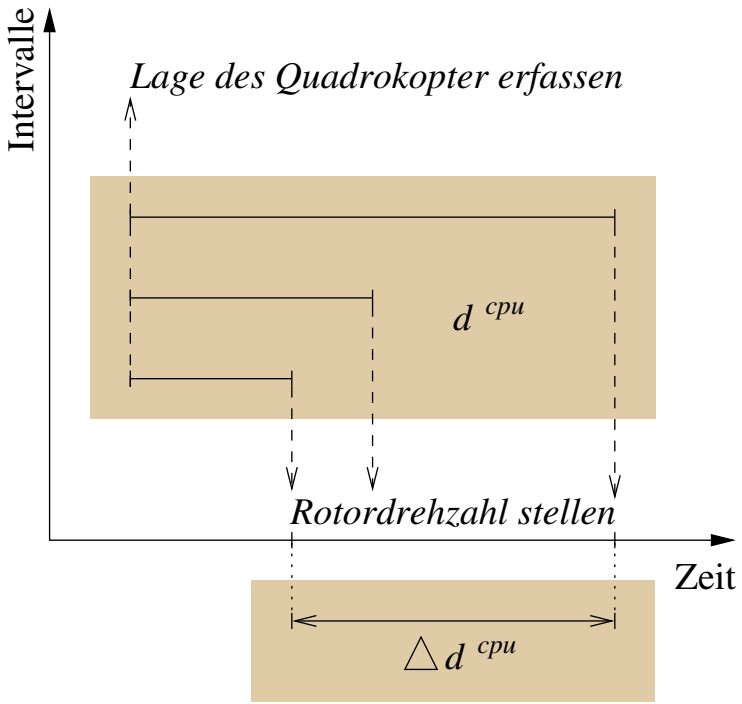
- verdrängende Einplanung
- überlappende Ein-/Ausgabe
- Programmunterbrechungen
- Busüberlastung, DMA

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

- bewirkt zusätzlichen Fehler
- beeinträchtigt die Dienstgüte

Kontrollierendes Rechensystem (Forts.)

Schwankung (engl. *jitter*) in den Messergebnissen



d^{cpu} ist trotz 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 können bei der Regelung nicht kompensiert werden, aber bekannte konstante Verzögerungen
- Randbedingung: $\Delta d^{cpu} \ll d^{cpu}$

Kontrolliertes Objekt $\leftrightarrow$ Kontrollierendes Rechensystem

Totzeit des offenen Regelkreises

d^{dead} Zeitintervall zwischen Start der Aktion zur Stellwertberechnung und Wahrnehmung einer Reaktion nach erfolgter Steuerung

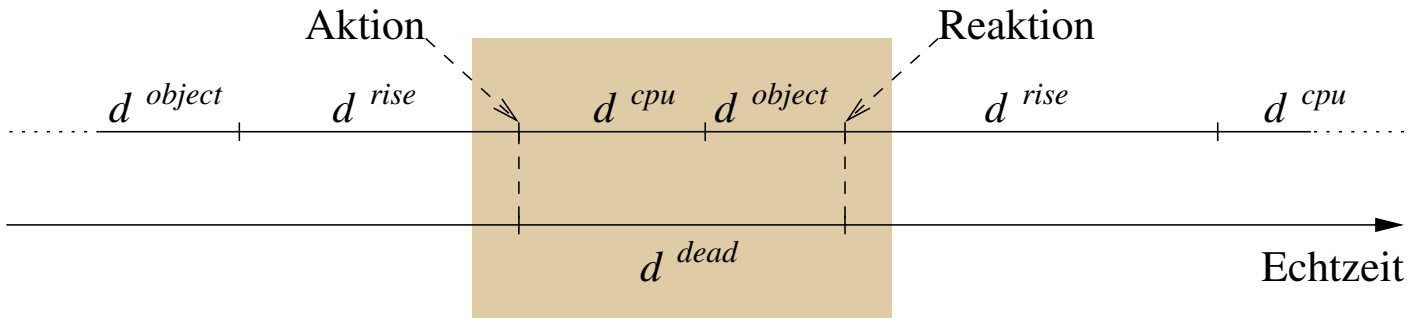
- setzt sich zusammen aus d^{cpu} und d^{object}, d.h.:
  1. der Implementierung des kontrollierenden Rechensystems
  2. der Dynamik des kontrollierten Objektes

Kontrolliertes Objekt $\leftrightarrow$ Kontrollierendes Rechensystem

Totzeit des offenen Regelkreises

d^{dead} Zeitintervall zwischen Start der Aktion zur Stellwertberechnung und Wahrnehmung einer Reaktion nach erfolgter Steuerung

- setzt sich zusammen aus d^{cpu} und d^{object}, d.h.:
  1. der Implementierung des kontrollierenden Rechensystems
  2. der Dynamik des kontrollierten Objektes

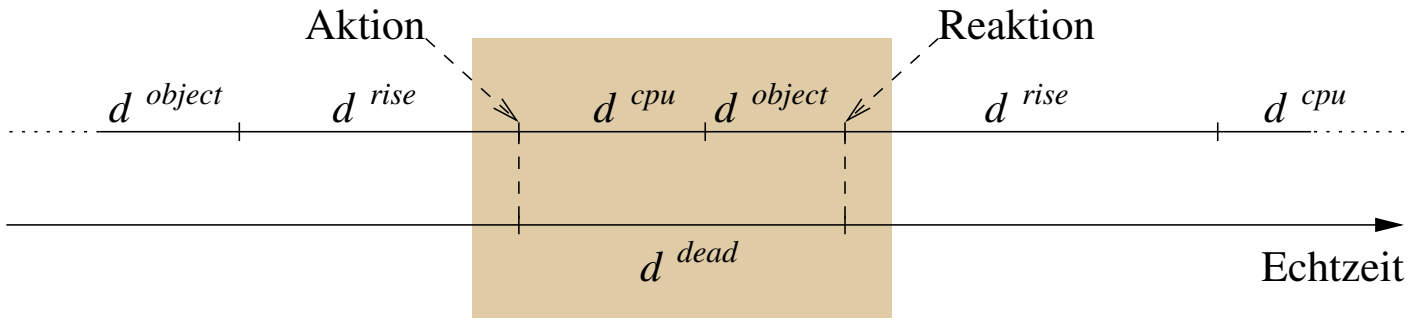


Kontrolliertes Objekt ↔ Kontrollierendes Rechensystem

Totzeit des offenen Regelkreises

d^{dead} Zeitintervall zwischen Start der Aktion zur Stellwertberechnung und Wahrnehmung einer Reaktion nach erfolgter Steuerung

- setzt sich zusammen aus d^{cpu} und d^{object}, d.h.:
  1. der Implementierung des kontrollierenden Rechensystems
  2. der Dynamik des kontrollierten Objektes

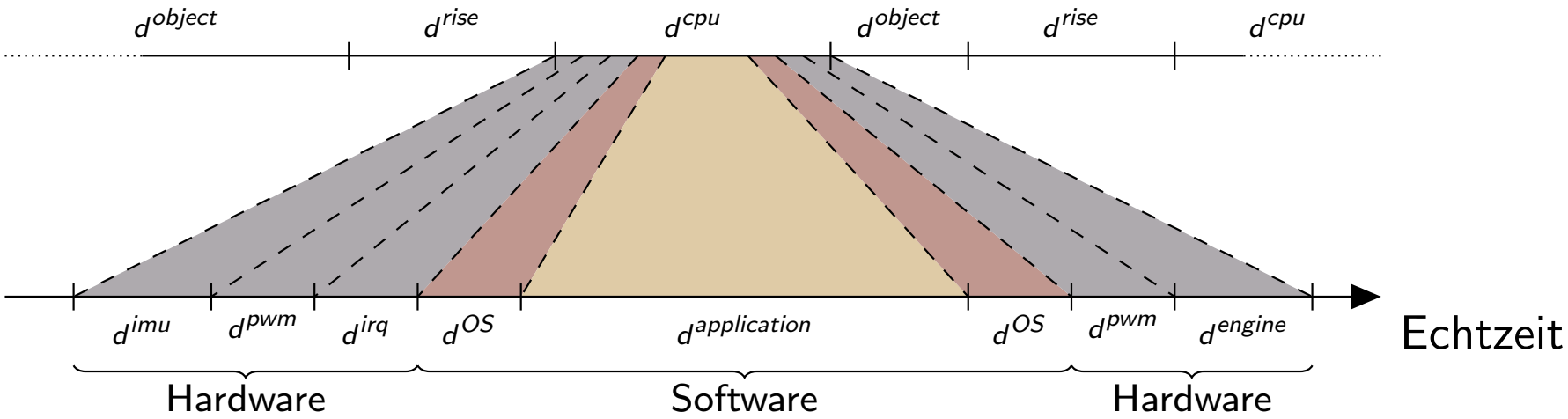


- beeinträchtigt Güte und Stabilität der Kontrollschleife
  - insbesondere in Anbetracht der mit d^{cpu} gegebenen Varianz
- gibt einem relative Ungewissheit über die erzielte Wirkung

Vorgänge im Rechensystem – Echtzeitanwendung

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

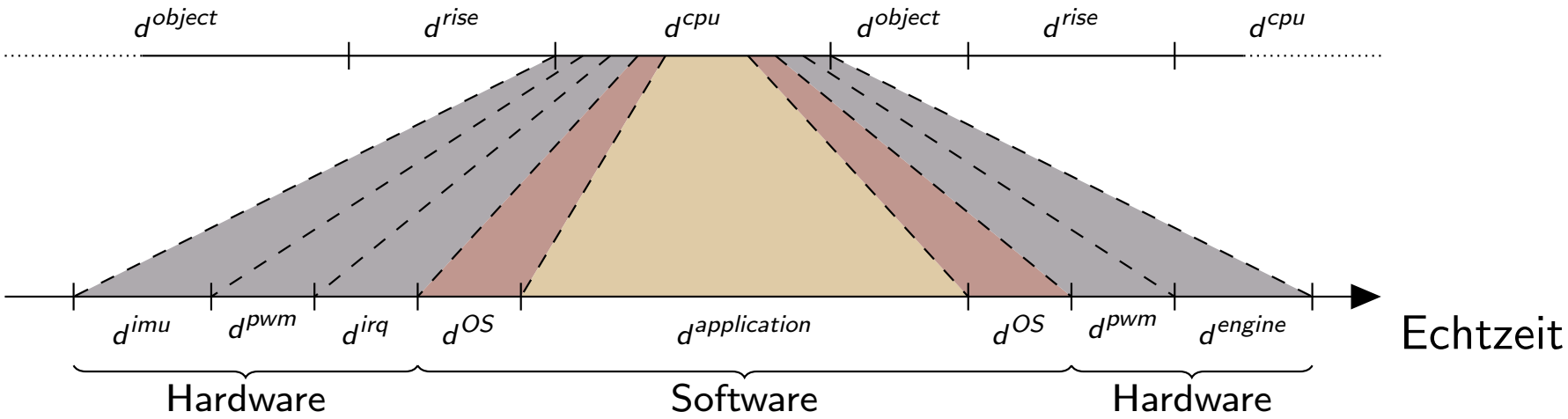
Das kontrollierende Rechensystem setzt sich aus verschiedenen Sensoren, Peripherie-Elementen und Softwarekomponenten zusammen.



Vorgänge im Rechensystem – Echtzeitanwendung

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

Das kontrollierende Rechensystem setzt sich aus verschiedenen Sensoren, Peripherie-Elementen und Softwarekomponenten zusammen.



☞ Alle Komponenten eines Echtzeitsystems 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 ($\rightsquigarrow d^{application}$)

Zeitbedarf im kontrollierenden Rechensystem

Welche Komponenten benötigen wie viel Zeit?

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

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) [3]

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

Zeitbedarf im kontrollierenden Rechensystem

Welche Komponenten benötigen wie viel Zeit?

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

- 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) [3]

Alleine die Anwendung kann (fast) komplett kontrolliert werden.[1]

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

Gliederung

Zeitliches Verhalten von Echtzeitanwendungen

Welche Elemente beeinflussen das zeitliche Verhalten einer Echtzeitanwendung?

- Welche Elemente müssen betrachtet werden?
  - Kann man sich auf die Echtzeitanwendung selbst beschränken?
  - Kann das Betriebssystem oder das Laufzeitsystem ignoriert werden?
  - Wie stark hängt dies vom verwendeten Prozessor ab?
- Auf welcher Ebene muss man diese Betrachtung durchführen?
  - Genügt es eine hohe Abstraktionsebene heranzuziehen?
  - Wo entscheidet sich das zeitliche Ablaufverhalten?

Zeitliches Verhalten von Echtzeitanwendungen

Welche Elemente beeinflussen das zeitliche Verhalten einer Echtzeitanwendung?

- Welche Elemente müssen betrachtet werden?
  - Kann man sich auf die Echtzeitanwendung selbst beschränken?
  - Kann das Betriebssystem oder das Laufzeitsystem ignoriert werden?
  - Wie stark hängt dies vom verwendeten Prozessor ab?
- Auf welcher Ebene muss man diese Betrachtung durchführen?
  - Genügt es eine hohe Abstraktionsebene heranzuziehen?
  - Wo entscheidet sich das zeitliche Ablaufverhalten?

☞ exemplarische Illustration anhand von Programmunterbrechungen

Unterbrechungsarten

Zwei Arten von Programmunterbrechungen werden unterschieden:

synchron die „Falle“ (engl. *trap*)

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

Unterbrechungsarten

Zwei Arten von Programmunterbrechungen werden unterschieden:

synchron die „Falle“ (engl. *trap*)

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

Unterschiede ergeben sich hinsichtlich...

- Quelle
- Synchronität
- Vorhersagbarkeit
- Reproduzierbarbeit

Unterbrechungsarten

Zwei Arten von Programmunterbrechungen werden unterschieden:

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 werden unterschieden:

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...

- zu Unterbrechungen siehe auch „Betriebssystemtechnik“ [4]

Synchrone Programmunterbrechung

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

$Trap \mapsto$ synchron, vorhersagbar, reproduzierbar

- geschieht abhängig vom Arbeitszustand des laufenden Programms:
  - unverändertes Programm, mit den selben Eingabedaten versorgt
  - auf ein und dem selben Prozessor zur Ausführung gebracht
- die Unterbrechungsstelle im Programm ist vorhersehbar

☞ die Programmunterbrechung/-verzögerung ist deterministisch

Asynchrone Programmunterbrechung

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

Interrupt $\mapsto$ asynchron, unvorhersagbar, nicht reproduzierbar

- tritt unabhängig vom Arbeitszustand des laufenden Programms auf:
  - hervorgerufen durch einen „externen Prozess“ (z.B. ein Gerät)
  - ein Ereignis signalisierend
- die Unterbrechungsstelle im Programm ist nicht vorhersehbar

☞ die Programmunterbrechung/-verzögerung ist nicht deterministisch

Trap/Interrupt $\rightsquigarrow$ Ausnahmesituationen

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)

Trap/Interrupt $\rightsquigarrow$ Ausnahmesituationen

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:

- als Ausnahme während der „normalen“ Programmausführung

Ausnahmebehandlung

Abrupter Zustandswechsel

Programmunterbrechungen implizieren nicht-lokale Sprünge:

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

Ausnahmebehandlung

Abrupter Zustandswechsel

Programmunterbrechungen implizieren nicht-lokale Sprünge:

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

Sprünge (und Rückkehr davon), die Kontextwechsel nach sich ziehen:

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

Ausnahmebehandlung

Abrupter Zustandswechsel

Programmunterbrechungen implizieren nicht-lokale Sprünge:

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

Sprünge (und Rückkehr davon), die Kontextwechsel nach sich ziehen:

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

☞ der Prozessorstatus unterbrochener Programme muss invariant sein

Zustandssicherung

Prozessorstatus invariant halten

Hardware (CPU) sichert einen Zustand minimaler Größe[2]

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

[2] Möglicherweise aber auch den kompletten Registersatz.

Zustandssicherung

Prozessorstatus invariant halten

Hardware (CPU) sichert einen Zustand minimaler Größe[2]

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

Software (Betriebssystem/Kompilierer) sichert den restlichen Zustand

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

[2] Möglicherweise aber auch den kompletten Registersatz.

Zustandssicherung

Prozessorstatus invariant halten

Hardware (CPU) sichert einen Zustand minimaler Größe[2]

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

Software (Betriebssystem/Kompilierer) sichert den restlichen Zustand

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

☞ je nach CPU werden dabei wenige bis sehr viele Daten(bytes) bewegt

[2] Möglicherweise aber auch den kompletten Registersatz.

Prozessorstatus sichern und wiederherstellen

Unabhängigkeit von der Sprachebene der Behandlungsprozedur

. . . alle dann noch ungesicherten CPU-Register:

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

`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

Unabhängigkeit von der Sprachebene der Behandlungsprozedur

. . . alle dann noch ungesicherten CPU-Register:

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.)

Abhängigkeit von der Sprachebene der Behandlungsprozedur

. . . alle flüchtigen Register[3] (engl. *volatile register*) der CPU:

x86

```
train:
  pushl %edx
  pushl %ecx
  pushl %eax
  call  handler
  popl  %eax
  popl  %ecx
  popl  %edx
  iret
```

[3] Register, deren Inhalte nach Rückkehr von einem Prozeduraufruf verändert worden sein dürfen: festgelegt in den Prozedurkonventionen des Kompilierers.

Prozessorstatus sichern und wiederherstellen (Forts.)

Abhängigkeit von der Sprachebene der Behandlungsprozedur

. . . alle flüchtigen Register[3] (engl. *volatile register*) der CPU:

x86

```
train:
  pushl %edx
  pushl %ecx
  pushl %eax
  call  handler
  popl  %eax
  popl  %ecx
  popl  %edx
  iret
```

m68k

```
train:
  moveml d0-d1/a0-a1,a7@-
  jsr handler
  moveml a7@+,d0-d1/a0-a1
  rte
```

[3] Register, deren Inhalte nach Rückkehr von einem Prozeduraufruf verändert worden sein dürfen: festgelegt in den Prozedurkonventionen des Kompilierers.

Prozessorstatus sichern und wiederherstellen (Forts.)

Abhängigkeit von den Eigenschaften des Kompilierers

. . . alle im weiteren Verlauf verwendeten CPU-Register:

gcc

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

Prozessorstatus sichern und wiederherstellen (Forts.)

Abhängigkeit von den Eigenschaften des Kompilierers

. . . alle im weiteren Verlauf verwendeten CPU-Register:

gcc

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

`__attribute__ ((interrupt))`

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

Aktivierungsblock (engl. *activation record*)

Sicherung/Wiederherstellung nicht-flüchtiger Register (engl. *non-volatile register*)

Türme von Hanoi

```
void hanoi (int n, char from, char to, char via) {
    if (n > 0) {
        hanoi(n - 1, from, via, to);
        printf("schleppe Scheibe %u von %c nach %c\n", n, from, to);
        hanoi(n - 1, via,  to,  from);
    }
}
```

Aktivierungsblock (engl. *activation record*)

Sicherung/Wiederherstellung nicht-flüchtiger Register (engl. *non-volatile register*)

Türme von Hanoi

```
void hanoi (int n, char from, char to, char via) {
    if (n > 0) {
        hanoi(n - 1, from, via, to);
        printf("schleppe Scheibe %u von %c nach %c\n", n, from, to);
        hanoi(n - 1, via,  to,  from);
    }
}
```

Aufwand je nach CPU, Prozedur, Kompilierer: `gcc -O6 -S hanoi.c`

`hanoi()`-Eintritt

```
pushl %ebp
movl  %esp,%ebp
pushl %edi
pushl %esi
pushl %ebx
subl  $12,%esp
```

`hanoi()`-Austritt

```
leal  -12(%ebp),%esp
popl  %ebx
popl  %esi
popl  %edi
popl  %ebp
ret
```

Für eine Prozedur aufrufende Ebene inhaltsinvariante Register der CPU, deren Inhalte jedoch innerhalb einer aufgerufenen Prozedur verändert werden:

gcc/x86 ∼ `ebp`, `edi`, `esi`, `ebx`

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

. . . 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

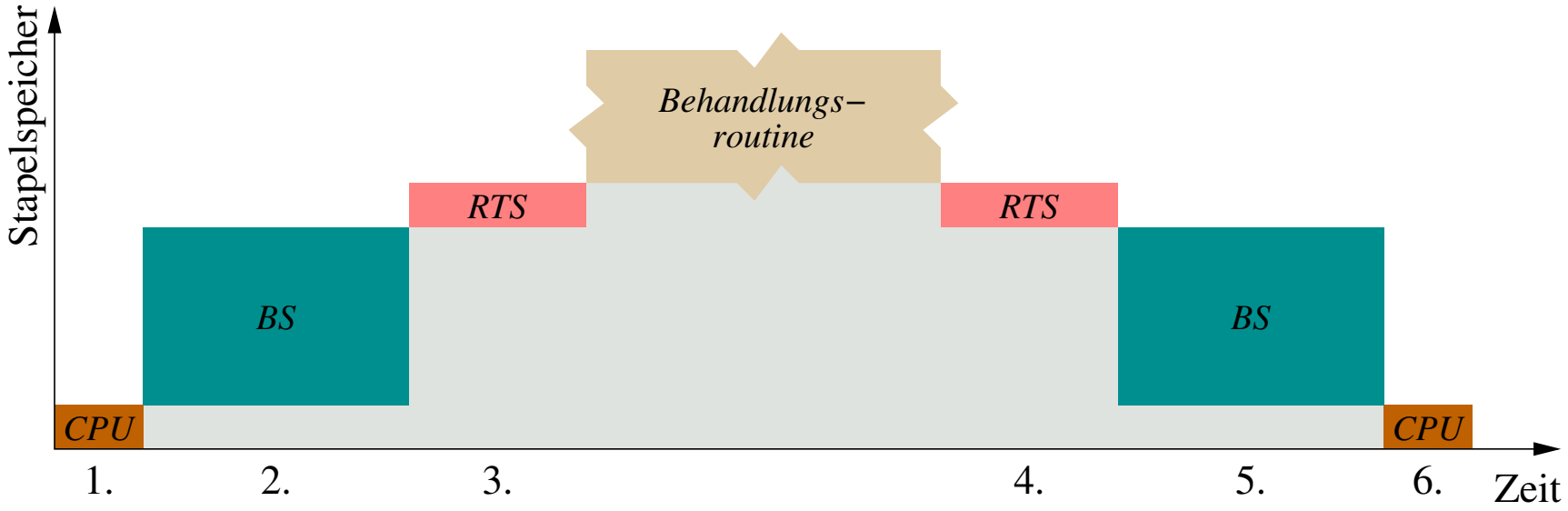
. . . bis zur Fortführung des unterbrochenen Programms:

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



Systemkonstanten bzw. Werte mit fester oberer Schranke sind gefordert:

- CPU resp. Hardware
- Betriebssystem (BS), Laufzeitsystem (engl. *run-time system*, RTS)
- „Anwendung“ (Behandlungsroutine)

Gliederung

Resümee

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

Resümee

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

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] 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

[4] Schröder-Preikschat, W. :
Betriebssystemtechnik.
http://www4.informatik.uni-erlangen.de/Lehre/BST, 2009. –
Lecture Notes