

# Phase 1: Anwendungsanalyse

## Echtzeitsysteme 2 - Vorlesung/Übung

Peter Ulbrich  
Wolfgang Schröder-Preikschat

Lehrstuhl für Informatik 4  
Verteilte Systeme und Betriebssysteme  
Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg

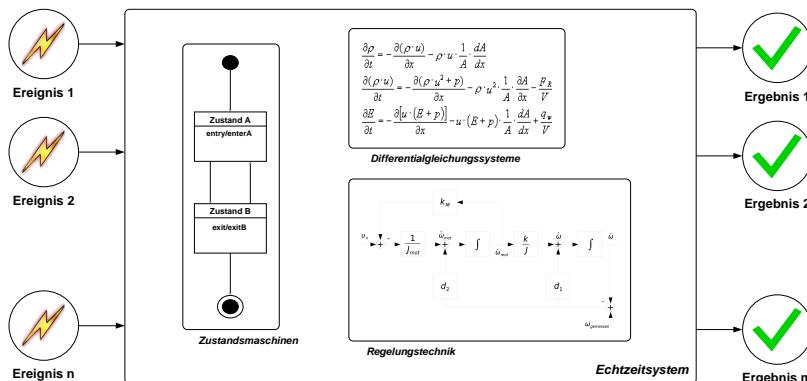
<http://www4.cs.fau.de/~{ulbrich,wosch}>  
[{scheler,wosch}@cs.fau.de](mailto:{scheler,wosch}@cs.fau.de)



1

## Einordnung – Phase 1

- Beziehungen zwischen **Ereignis n** und **Ergebnis m**
  - zeitlich** – wie viel Zeit darf verstreichen → Termine
  - physikalisch** – wie ist das Ergebnis zu bestimmen?



3

## Übersicht

- Einordnung
- Zielsetzung
- Problematik
- Lösungsansätze
- Anforderungen & Fakten

© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

2

## Zielsetzung

- physikalisches Objekt
  - Welche Größen sind relevant?
  - Wie hängen diese Größen zusammen?
- Echtzeitsystem
  - Welche Ereignisse gilt es zu behandeln?
  - Welche Zeitschranken gilt es einzuhalten?
  - Welche Beziehung Zeitschranke ↔ physikalisches Objekt gibt es?
- Wie sieht das physikalische Modell aus?
  - Welche Größen des physikalischen Objekts muss man abbilden?
  - Wie bildet man diese Größen ab?

© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

4

## Problematik

- selbst einfach erscheinende Objekte sind aus physikalischer Sicht äußerst komplex
- Vereinfachungen sind unabdingbar
- Beispiel: Hau den Lukas



© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

5

## Problematik: Hau den Lukas

- **Schaltvorgänge** an den Spulen sind **nicht konstant!**
  - Ein- und Ausschaltvorgänge und die Induktionsgesetze
- **Induktivität** der Spule ist **nicht konstant!**
  - Wo ist der Eisenkern in der Spule?
- **Kraft** auf den Eisenkern in der Spule ist **nicht konstant!**
  - Wo ist der Eisenkern in der Spule?
  - Welche Geschwindigkeit hat der Eisenkern?
- **Beschleunigung** des Eisenkerns ist **nicht konstant!**
  - Kraft auf den Eisenkern ist nicht konstant
- komplexe, zeitabhängige Vorgänge
  - macht Integration notwendig
  - häufig nicht mehr analytisch darstellbar
  - numerische Lösung wird erforderlich



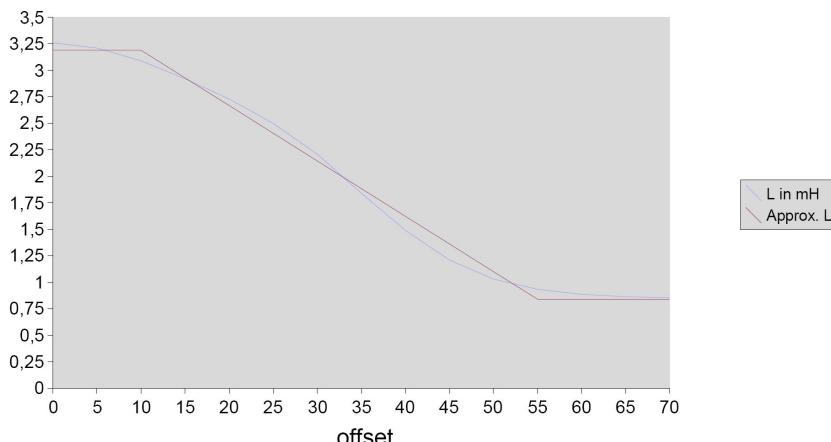
© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

6

## Ergebnisse: Hau den Lukas (SS 2006)

- Induktivität der Spule
  - in Abhängigkeit der Position des Eisenkerns

Induktivität



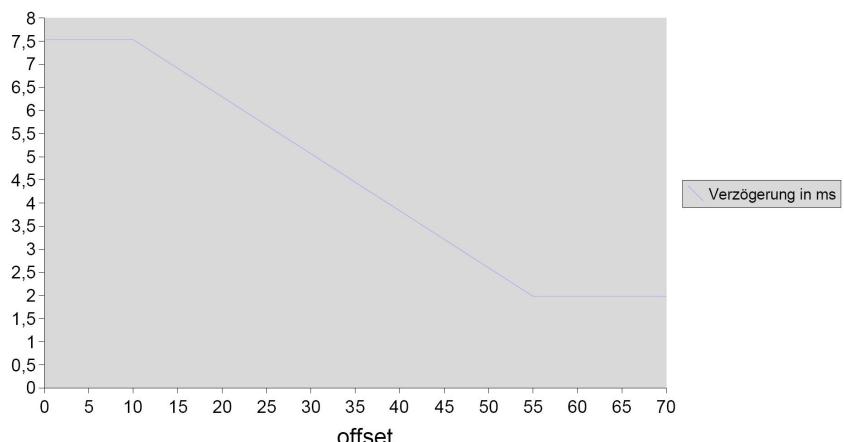
© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

7

## Ergebnisse: Hau den Lukas (SS 2006)

- Schaltverzögerung der Spule
  - in Abhängigkeit der Position des Eisenkerns

Zeitverzögerung

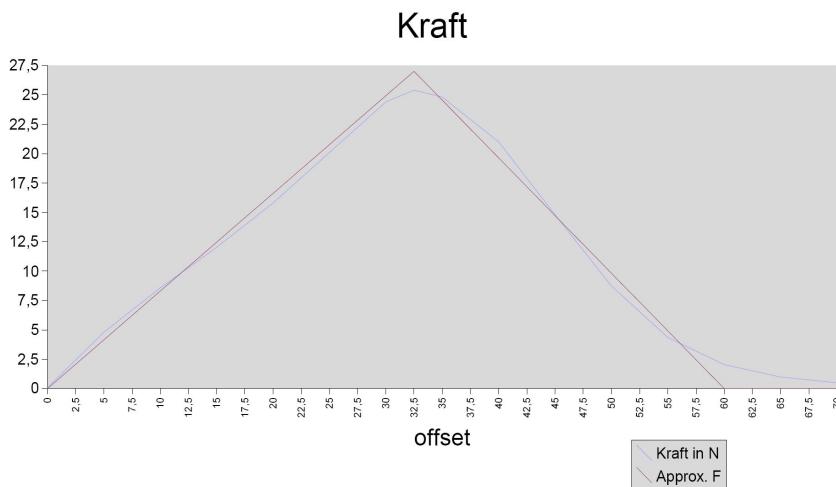


© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

8

## Ergebnisse: Hau den Lukas (SS 2006)

- Kraftwirkung der Spule auf den Eisenkern
  - in Abhängigkeit der Position des Eisenkerns



## Lösungsansätze

- Reduktion auf den Zustand
- Regelungstechnik



## Ergebnisse: Hau den Lukas (SS 2006)

- selbst das Modell ist bereits stark vereinfacht
- verschiedene Größen werden nicht berücksichtigt
  - Gegeninduktion
  - Wirbelströme
  - Luftwiderstand
- experimentelle Bestimmung gewisser Randparameter

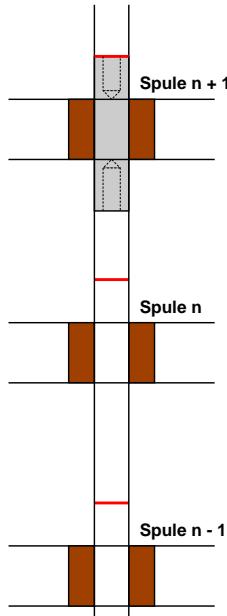


## Reduktion auf den Zustand

- ... genauer: den beobachtbaren Zustand
- Idee
  - man kann den Zustand **immer beobachten** ...
  - und man kann ihn **gezielt** und **exakt manipulieren**
- Konsequenz für unser Modell
  - es kann auf den beobachtbaren Zustand reduziert werden
  - häufig gibt es nur noch diskrete Wertebereiche
  - reine Kausalitäts- also Ursache-Wirkung-Beziehung
- ✓ drastische Vereinfachung des Modells
  - ohne relevante Eigenschaften zu verlieren



## Beispiel: Hau den Lukas



- Beobachtung
  - der letzten Spule: durch Lichtschranken
  - der Bewegungsrichtung:
    - aktuelle Spule: **Spule n**
    - vorherige Spule: **Spule n + 1** → aufwärts
    - vorherige Spule: **Spule n - 1** → abwärts
- Manipulation
  - Eisenkern kann
    - festgehalten werden
    - fallen gelassen werden
    - angehoben werden
- ✓ Zustand ist
  - vollständig beobachtbar und
  - gezielt manipulierbar

© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

13

## Nachteil

- dieses Modell sagt nichts aus über ...
  - den Eisenkern
  - die verwendeten Spulen
  - die Umgebungstemperaturen
- ➔ Eine gezielte Manipulation kann nicht garantiert werden
  - wenn diese Größen verändert werden
- ➔ System muss sich *gutmütig* verhalten
  - gegenüber Parametern, die man nicht kontrollieren kann
  - diese Parameter kann man dann vernachlässigen
- ✗ Längst nicht alle Systeme erfüllen diese Eigenschaft

© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

14

## Regelungstechnik

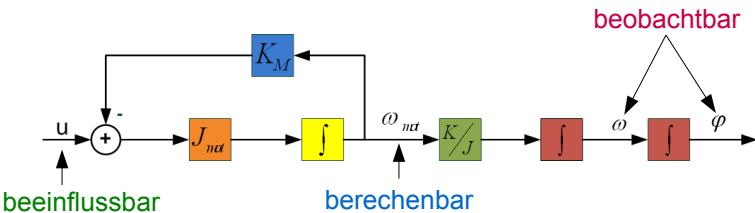
- Problem
  - interner Zustand ist **nicht beobachtbar**
  - interne Parameter beeinflussen das **System** in relevantem Umfang
- Idee
  - **Nachbildung/Berechnung des Zustandes**
    - physikalisches Modell
    - inkl. internem Verhalten
- ➔ Konsequenz für unser Modell
  - mathematisch/physikalische Beschreibung des Systems
  - Bestimmung der Systemparameter: Trägheit, Widerstand, ...
  - Berücksichtigung vergangener Zustände
- ✓ Beschreibung des Systems durch das Modell
  - exakte Analyse notwendig

© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

15

## Regelungstechnik

- Systemtheorie
  - **Eingangsvektor** → Abweichung vom Sollwert des Systems
  - **Ausgangsvektor** → Ist-Wert des Systems
  - **Systemmatrix** → Rückkopplung der internen Zustände



### System-Modell

- Beschreibt die Zusammenhänge zwischen **beeinflussbaren**, **beobachtbaren** und **berechenbaren** Systemparametern

© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

16

## Beispiel: Quadrocopter

- Beobachtung
    - Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  und Lage  $\varphi$  um X bzw. Y-Achse
  - Manipulation
    - erzeugte Schubkraft kann variiert werden
    - geregelt wird die Spannung u der Motoren
  - Reaktion
    - abhängig von den Momenten des Objekts (Masse, Trägheit)
    - und Motor/Propeller (Trägheit, Reibung, Wirkungsgrad)
  - ✓ Zustand
    - nicht beobachtbar, aber berechenbar



© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

17

## Anforderungen & Fakten

- NXT Standalone
  - Hau den Lukas
  - Generator
  - *4Copter*



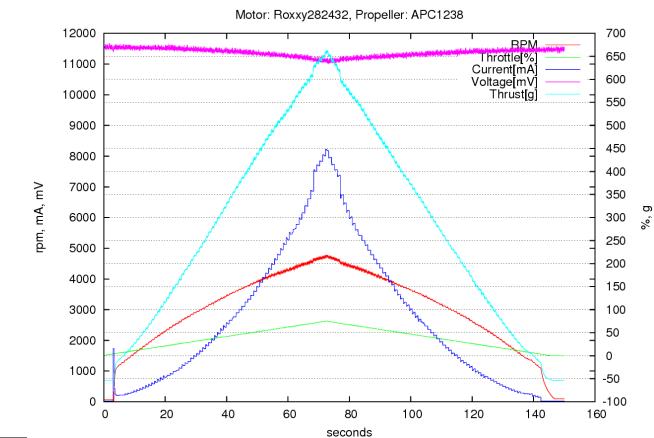
---

© {ulbrich.scheler.wosch}@cs.fau.de - E7I (SS 2011)

19

## Modellbildung

- Berechnung beliebiger Zustände
  - Bestimmung durch Messung
    - Erstellen von Kennlinien (Messung zusätzlicher Parameter)
    - Ableiten von Konstanten oder Funktionen
  - z.B. Motor
    - Messung
      - Schubkraft
      - Drehzahl
      - Stromaufnahme
      - Spannung
    - Motorkonstante
    - Funktion
      - Spannung/Schub

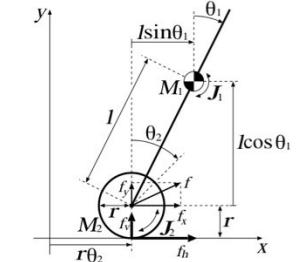


© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

18

## Anforderung: NXT Standalone

- **Zielsetzung:** Stabiler Stand
    - Zusätzlich: **Fahren & Ausweichen**
    - Optional: **Fernsteuerung**
    - Variante: Robot on a ball
  - **Reglerimplementierung**
    - Regelgröße:
      - **Motorspannung** → Winkel (Rad)
    - Regelziele:
      - **Stabilisierung** (Winkel)
      - **Positionsbestimmung** (Weg)
    - PID-Regler und Sensorfusion:
      - Gyroskop und Winkelencoder



---

© {ulbrich scheler wosch}@cs.fau.de - EZI (SS 2011)

20

## Fakten: NXT Standalone (1)

### ■ NXT Block

- Hauptprozessor: **32-bit ARM7** (AT91SAM7S256)
  - 256 KB FLASH, 64 KB RAM, 48 MHz
- Co-Prozessor: 8-bit AVR ATmega48
  - 4 KB FLASH, 512 Byte RAM, 8 Mhz



### ■ Schnittstellen

- **4 Eingänge** (analog/digital)
- **3 Ausgänge** (Rückkanal)
- 4 Druckknöpfe

### ■ Kommunikation

- **Bluetooth** CSR BlueCoreTM 4 v2.0 +EDR System
- USB 2.0 Anschluss



© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

21

## Anforderungen: Hau den Lukas (1)

### ■ Programmierbarkeit

- ein Programm wird durch eine Datenstruktur beschrieben, die durch Prozeduraufrufe erzeugt/initialisiert wird

```
lift_continuous(my_prog, 7);  
fall_stepwise(my_prog, 2);  
lift_continuous(my_prog, 4);  
...
```

- schließlich wird dieses Programm ausgeführt  
start\_program(my\_prog);

### ■ folgende Primitive sollen beherrscht werden

- schrittweise anheben/fallen lassen
- kontinuierlich anheben/fallen lassen

### ■ Primitive sind kombinierbar



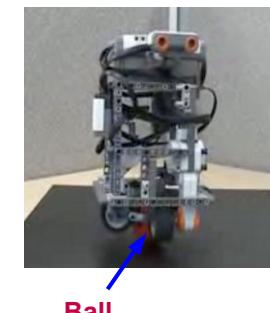
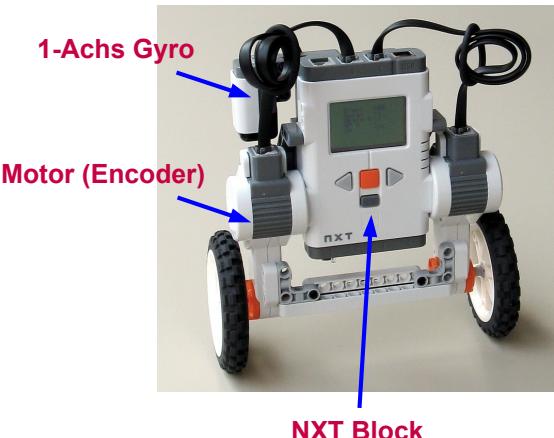
© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

23

## Fakten: NXT Standalone (2)

### ■ Varianten:

Ultraschall Abstandssensor



Ball



© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

22

## Anforderungen: Hau den Lukas (2)

### ■ Benutzerschnittstelle

- Programme werden unveränderlich gespeichert
  - ein Wechsel zwischen den Programmen ist aber möglich
- Programme werden geladen
  - Interaktion über die serielle Schnittstelle bzw. CAN-Bus

### ■ Not-Aus-Funktion

- sofortiges Stoppen der normalen Funktion
  - Übergang in einen sicheren Zustand

### ■ Monitoring/Überwachung

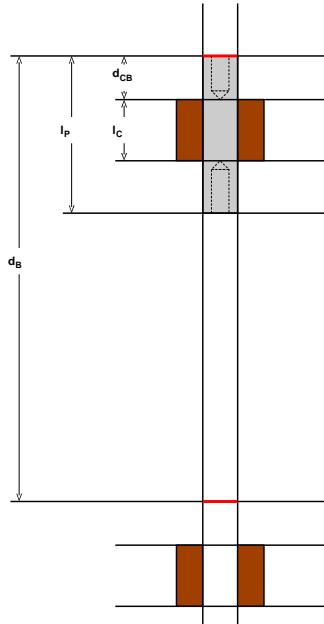
- kritische Systemzustände werden erkannt und angezeigt
  - z.B. wenn Spulen zu lange aktiviert sind
- Profiling
  - wie lange ist welche Spule an, wie oft wurde welche Spule durchlaufen



© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

24

## Fakten: Hau den Lukas



$I_c$	Länge: Spule	30 mm
$I_p$	Länge: Projektil	82 mm
$d_B$	Abstand: Lichtschranken	230 mm
$d_{CB}$	Abstand: Spule – Lichtschranke	24 mm

© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

25



## Fakten: Hau den Lukas

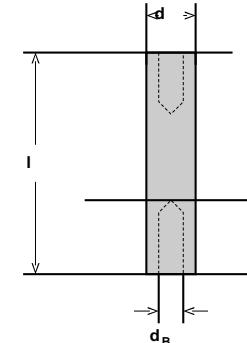
- Ansteuerung der Spulen
    - Pin 0.5 – Pin 0.12 (x.y: x – Port, y – Pin)
  - Abfrage der Lichtschranken
    - Pin 7.0 – Pin 7.7
  - Unterbrechungen der Lichtschranken
    - Pin 1.0
  - Dauer von Auslösung der Lichtschranke bis zur ISR
    - vernachlässigbar

© {ulbrich.scheler.wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

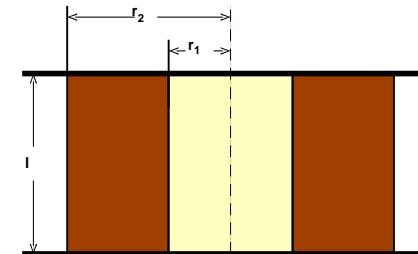
---

27

## Fakten: Hau den Lukas



$l$	Länge: Projektil	82 mm
$l_B$	Länge: Bohrung	26 mm
$d$	Durchmesser: Projektil	18,6 mm
$d_B$	Durchmesser: Bohrung	10 mm
$m$	Gewicht	144 g
	Material: Eisen	



$I$	effektive Länge	23 mm
$r_1$	Innendurchmesse	28 mm
$r_2$	Außendurchmesse	mm
$I$	Induktivität	0,82 mH
$R$	Widerstand	0,52 Ohm
$N$	Windungszahl	178
	Toleranz	3.00%

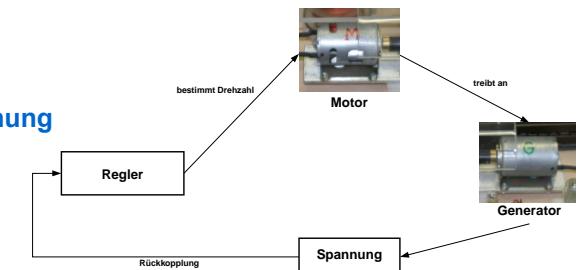
© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

26



## Anforderung: Generator

- **Regelkreisimplementierung**
    - *naiver* Regler
      - Hochfrequente Abtastung des Systems
      - kleine Änderungen der Stellgrößen
    - Reglerimplementierung
      - mit/ohne Beobachter
    - Bestimmung der Kennlinien für Motor und Generator
    - Evaluation: Einschwingverhalten
  - **Leitwarte**
    - Bedienpult
    - **Steuerung & Überwachung**



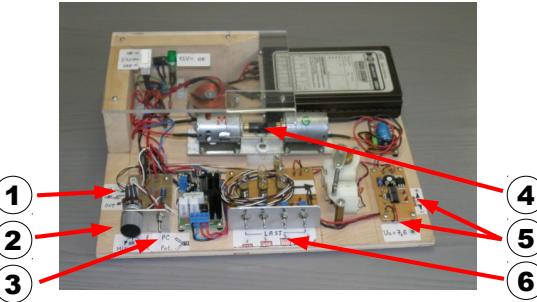
---

© {ulbrich.scheler.wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

---

28

## Fakten: Generator



- |                                       |                               |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| 1. Steuerspannung des Motors          | 4. Motordrehzahl              |
| ▪ kontinuierlich (PWM-Signal)         | ▪ Messung durch Lichtschranke |
| ▪ diskret (256 Stufen, extra Platine) | 5. Referenzspannung (7,8 V)   |
| 2. Manuelle Steuerung                 | ▪ optisch ablesbar            |
| ▪ Durch Potentiometer                 | ▪ Abgreifbar                  |
| 3. Umschaltung                        | 6. Zuschaltung div. Lasten    |
| ▪ Steuerspannung/manuell              | ▪ konstant                    |
|                                       | ▪ variabel                    |



© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

29

## Fakten: Generator

### 1. Einstellung der Referenzspannung

- Manuell oder über Bedienpult

### 2. „Kalibrierung“ des Reglers

### 3. Umschalten auf die Steuerspannung

- Und damit auf den implementierten Regler

### 4. Rückmeldung an die Leitwarte

- Überwachung und Kontrolle



© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

30

## Anforderung: I4Copter

- **Zielsetzung:** semi-autonomer Flug
  - Stabiler **Schwebeflug**
  - Unterstützung durch automatisches **Starten & Landen**
  - Anfliegen von Wegpunkten - **Autopilot**
- **Komponentenüberwachung und Verhaltensmodell**
  - **Komponentenzustand** und **-überwachung** (Init, Active, Error)
  - Analyse und Spezifikation von Arbeitspunkten
  - Übergeordnetes **Verhaltensmodell** (z.B. Zustandsautomat)
- **Höhen-Regler**
  - Bestimmung der relativen Höhe über Ultraschall-Abstandssensor
  - und der absoluten Höhe über Druck-Sensoren
  - Unterschiedliche **Arbeitspunkte** (Start / Landung; Flug)

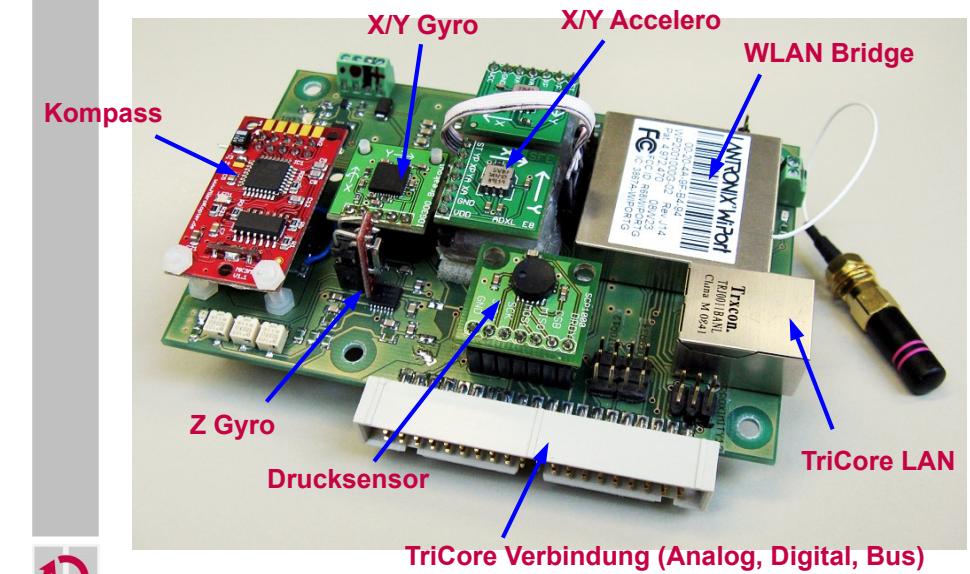


© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

31

## Fakten: I4Copter (1)

### I4Copter Periphery Board Mark2

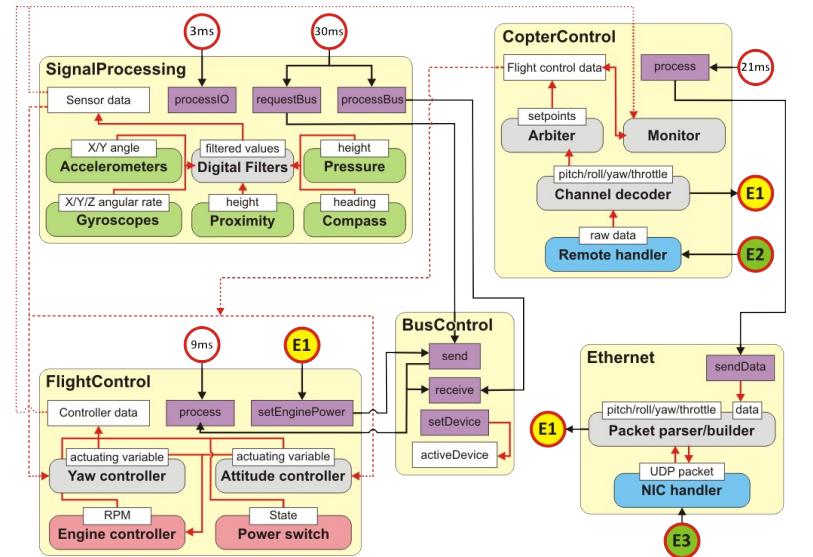


© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

32

## Fakten: I4Copter (2)

### I4Copter Software Struktur



© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

33

## Fazit

- scheinbare Vorgänge sind physikalisch sehr komplex
- komplexe physikalische Vorgänge sind mathematisch häufig nicht analytisch lösbar
  - Vereinfachungen des Modells
  - numerische Lösungsansätze
- Massive Vereinfachungen sind notwendig
  - Was muss man wirklich wissen?
  - Was kann man wissen/messen?
  - Welche Einschränkungen sind damit verbunden?

Entwurf des Echtzeitssystems setzt Vertrautheit mit dem physikalischen Objekt voraus!

## Fazit

- scheinbare Vorgänge sind physikalisch sehr komplex
- komplexe physikalische Vorgänge sind mathematisch häufig nicht analytisch lösbar
  - Vereinfachungen des Modells
  - numerische Lösungsansätze
- Massive Vereinfachungen sind notwendig
  - Was muss man wirklich wissen?
  - Was kann man wissen/messen?
  - Welche Einschränkungen sind damit verbunden?

© {ulbrich,scheler,wosch}@cs.fau.de - EZL (SS 2011)

34

## Ergebnis

- Welche Aktivitäten laufen in dem System ab?
  - Können diese Aktivitäten feiner strukturiert werden?
  - Laufen Elemente einer Aktivität zeitgleich ab?
  - Das sind die **Aufgaben!**
- Wann werden diese Aktivitäten ausgeführt?
  - Welche zeitlichen Eigenschaften haben diese Zeitpunkte?
  - Das sind die **Ereignisse!**
- Was hängt von den berechneten Ergebnissen ab?
  - Wie viel Zeit kann dabei verstreichen?
  - Das sind die **Termine!**