DIY – Individual Prototyping and Systems Engineering

Grundlagen und Terminologie

Peter Ulbrich

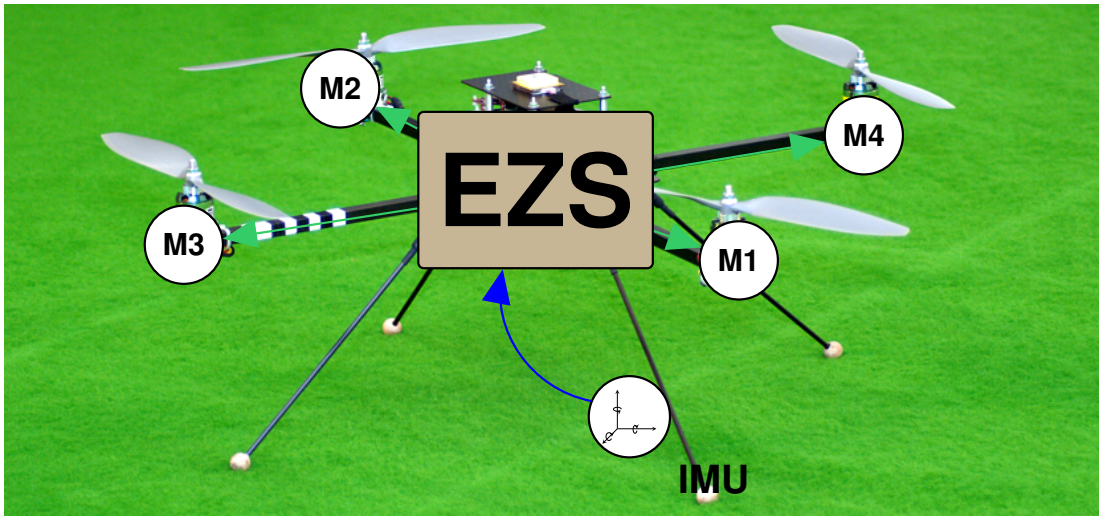
Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

`https://www4.cs.fau.de`

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

☞ 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

⚠ Wie lange dauert es bis zum Gleichgewicht?

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

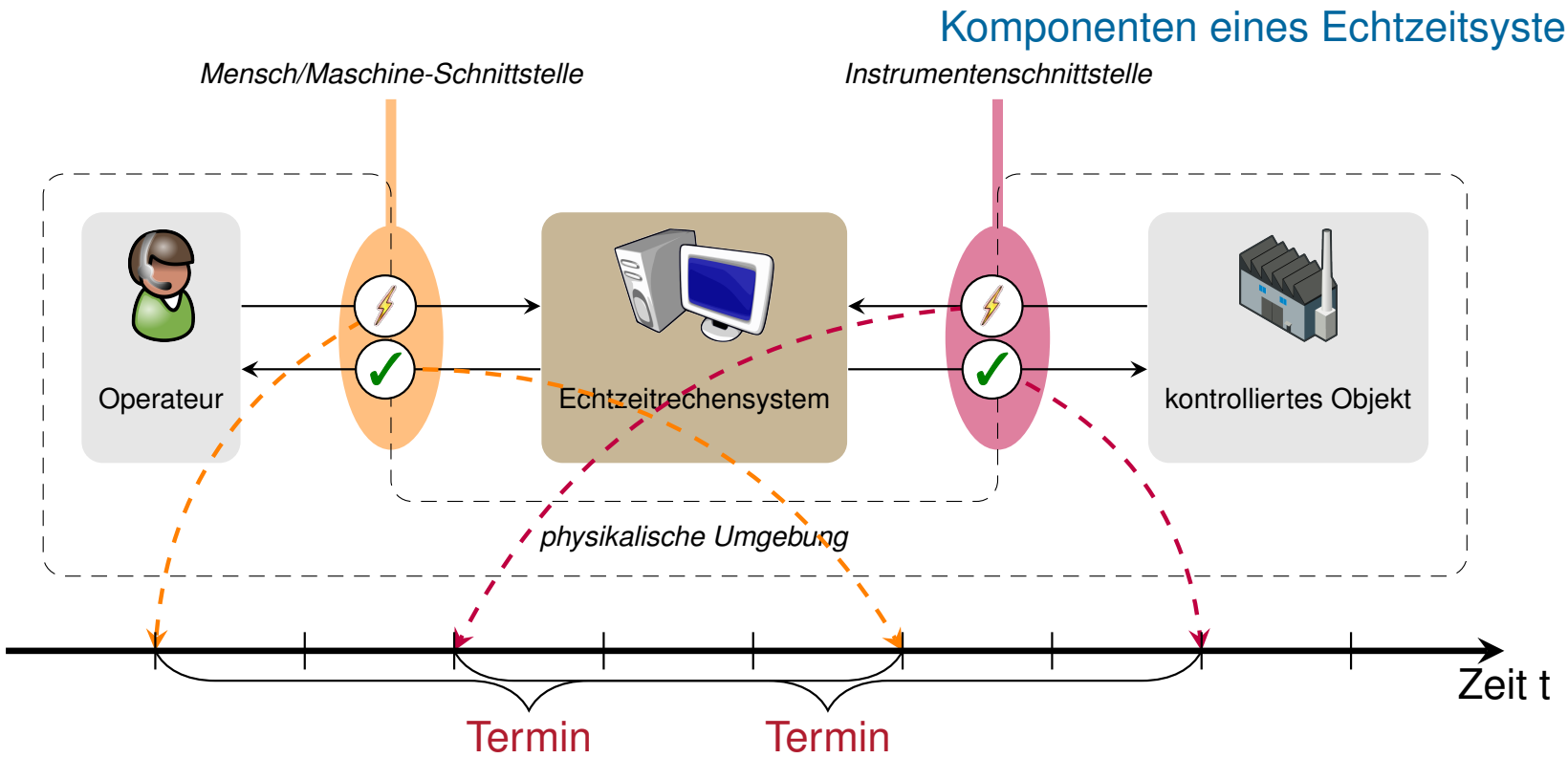
→ Objektdynamik und -physik

☞ 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 beeinflüsst werden

Kopplung mit der (realen) Umwelt



- Echtzeitrechensystem interagiert mit der physikalischen Umwelt
- Berechnet als Reaktion auf Ereignisse (engl. *event*, Stimuli) der Umgebung Ergebnisse (engl. *result*)
- Zeitpunkt, zu dem ein Ergebnis vorliegen muss, wird als Termin oder Frist (engl. *deadline*) bezeichnet

Verarbeitung von Programmen in Echtzeit

Echtzeitbetrieb bedeutet Rechtzeitigkeit

- Funktionale Korrektheit reicht für korrektes Systemverhalten nicht aus
- Rechtzeitige Bereitstellung der Ergebnisse ist entscheidend

- Den Rahmen stecken der Eintrittspunkt des Ereignisses und der entsprechende Termin ab

Termine hängen dabei von der Anwendung ab

wenige Mikrosekunden	z.B. Drehzahl- und Stromregelung bei der Ansteuerung von Elektromotoren
einige Millisekunden	z.B. Multimedia-Anwendungen (Übertragung von Ton- und Video)
Sekunden, Minuten, Stunden	z.B. Prozessanlagen (Erhitzen von Wasser)

Geschwindigkeit impliziert nicht unbedingt Rechtzeitigkeit

Geschwindigkeit ist keine Garantie für die rechtzeitige Bereitstellung von Ergebnissen

- Asynchrone Programmunterbrechungen (engl. *interrupts*) können unvorhersagbare Laufzeitvarianzen verursachen
- Schnelle Programmausführung ist bestenfalls hinreichend für die rechtzeitige Bearbeitung einer Aufgabe

Zeit ist keine intrinsische Eigenschaft des Rechensystems

- Die Zeitskala des Rechensystems muss nicht mit der durch die Umgebung vorgegebenen (Realzeit) übereinstimmen $\rightsquigarrow$ Zeitgeber?

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

Konsequenzen überschrittener Termine

- **Weich** (engl. *soft*) auch „schwach“
  - Ergebnis verliert mit zunehmender Terminüberschreitung an Wert (z.B. Bildrate bei Multimediasystemen)

  → Terminverletzung ist tolerierbar

- **Fest** (engl. *firm*) auch „stark“
  - Ergebnis wird durch eine Terminüberschreitung wertlos und wird verworfen (z.B. Abgabetermin einer Übungsaufgabe)

  → Terminverletzung ist tolerierbar, führt zum Arbeitsabbruch

- **Hart** (engl. *hard*) auch „strikt“
  - Terminüberschreitung kann zum Systemversagen führen und eine „Katastrophe“ hervorrufen (z.B. Airbag)

  → Terminverletzung ist keinesfalls tolerierbar

Arten von Echtzeitsystemen

- Fest/Hart ↦ Terminverletzung ist nicht ausgeschlossen[1]
  - Terminverletzung wird vom Betriebssystem erkannt

→ Weiteres Vorgehen hängt von der Art des Termins ab

Fest ⇝ plangemäß weiterarbeiten

- Betriebssystem bricht den Arbeitsauftrag ab
- Nächster Arbeitsauftrag wird (planmäßig) gestartet

→ Transparent für die Anwendung

hart ⇝ sicheren Zustand finden

- Betriebssystem löst eine Ausnahmesituation aus
- Ausnahme ist intransparent für die Anwendung

→ Anwendung behandelt diese Ausnahme

[1] Auch wenn Ablaufplan und Betriebssystem auf dem Blatt Papier Determinismus zeigen, kann das im Feld eingesetzte technische System von unbekannten/unvermeidbaren Störeinflüssen betroffen sein!

Arten von Echtzeitsystemen (Forts.)

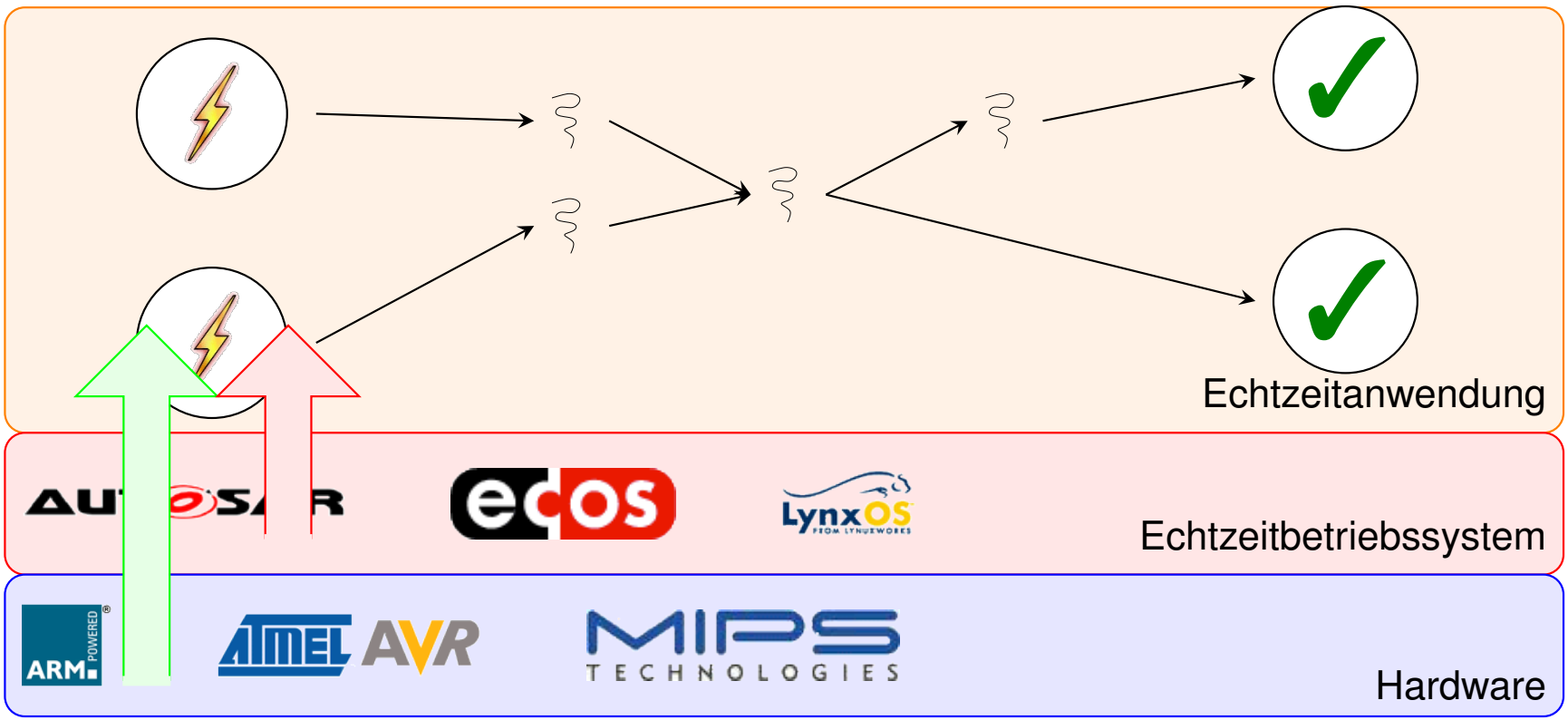
Radikale Unterschiede im Systementwurf zeichnen sich ab. . .

- Hard real-time computer system
  (dt. Hartes Echtzeitrechensystem)
  - Rechensystem mit mind. einem hartem Termin
  - Garantiert unter allen (spezifizierten) Last- und Fehlerbedingungen
  - Laufzeitverhalten ist ausnahmslos deterministisch
  - Typisch für sicherheitskritische Echtzeitrechensysteme
    - engl. *safety-critical real-time computer system*
    - Beispiel: Fluglageregelung, Airbag, . . .

- Soft real-time computer system
  (dt. Weiches Echtzeitrechensystem)
  - Rechensystem welches keinen harten Termin erreichen muss
  - Termine können gelegentlich verpasst werden

Gliederung

Begriffsbildung: Echtzeit-{Anwendung, Rechensystem}



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?!

☞ Es kommt auf die Betrachtungsebene an!

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*)

- 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

Verdrängbarkeit

Verschränkung (engl. *interleaving*) von Arbeitsaufträgen

Arbeitsaufträge könn(t)en verschränkt ausgeführt werden, wenn:

- Diese verdrängbar sind (typischerweise durch den Planer)
- Die Zeitbedingungen (engl. *time constraints*) es erlauben

Präemptivität (engl. *preemptivity*) ist eine Eigenschaft des jeweiligen Arbeitsauftrags:

- Verdrängbar (engl. *preemptable*) ist ein Arbeitsauftrag, wenn seine Ausführung suspendiert werden darf
  - An beliebigen Stellen (engl. *fully preemptive*)
  - An ausgewiesenen Stellen (engl. *preemption points*)
- Unverdrängbar (engl. *non-preemptable*), sonst
  - Der Arbeitsauftrag läuft durch (engl. *run-to-completion*)

Mischbetrieb $\rightsquigarrow$ Präemptivität als Auftragattribut implementiert

Gliederung

Grundsätzliche Verfahren

Vorangetrieben durch interne oder externe Ereignisse

Zeitgesteuert (engl. *time-triggered*, auch *time driven*) ✓

- Einlastung nur zu festen Zeitpunkten
  → Vorgegeben durch das Echtzeitrechensystem
- Offline (entkoppelte) Einplanung

Reihum gewichtet (engl. *weighted round robin*)

- Echtzeitverkehr in Hochgeschwindigkeitsnetzen
  - im Koppelnetz (engl. *switched network*)
- Untypisch für die Einplanung von Arbeitsaufträgen

Ereignisgesteuert (engl. *event-triggered*, auch *event driven*) ✓

- Einlastung zu Ereigniszeitpunkten
  → Vorgegeben durch das kontrollierte Objekt
- Online (gekoppelte) Einplanung

Zeitgesteuertes (engl. *time-triggered*) Echtzeitsystem

Einlastungszeitpunkte von Arbeitsaufträgen *à priori* bestimmt

- Alle Parameter aller Arbeitsaufträge sind *off-line* bekannt
- WCET, Betriebsmittelbedarf (z.B. Speicher, Fäden, Energie), ...

Verwaltungsgemeinkosten zur Laufzeit sind minimal

- Einlastung erfolgt in variablen oder festen Intervallen
  - Variables Intervall durch Zeitgeber (engl. *timer*) mit der Länge des jeweils einzulastenden Arbeitsauftrags programmiert ↦ WCET (siehe Kapitel III-3)
    - Jeder Zeitablauf bewirkt eine asynchrone Programmunterbrechung
    - Als Folge findet die Einlastung des nächsten Arbeitsauftrags statt
  - Festes Intervall mittels regelmäßiger Unterbrechungen (Zeitgeber)
    - Festes Zeitraster liegt über die Ausführung der Arbeitsaufträge
    - Dient z.B. dem Abfragen (engl. *polling*) von Sensoren/Geräten

Ereignisgesteuertes (engl. *event-triggered*) Echtzeitsystem

Einplanung und Einlastungszeitpunkte vorab nicht bekannt

- Asynchrone Programmunterbrechungen: Hardwareereignisse
  - Zeitsignal, Bereitstellung von Sensordaten, Beendigung von E/A
- Synchronisationspunkte: ein-/mehrseitige Synchronisation
  - Schlossvariable, Semaphor, Monitor

Ereignisse haben Prioritäten $\mapsto$ Dringlichkeiten

- Zuteilung von Betriebsmitteln erfolgt prioritätsorientiert
  - Arbeitsaufträge höherer Priorität haben Vorrang
- Prioritäten werden *offline* vergeben und ggf. *online* fortgeschrieben
  - Arbeitsaufträge haben eine statische oder dynamische Priorität
- Betriebsmittel (insb. CPU) bleiben niemals absichtlich ungenutzt
  - Im Gegensatz zur Ereignissteuerung, die Betriebsmittel brach liegen lässt

Periodische Aufgabe (engl. *periodic task*)

Periodische Aufgaben

Aufgaben die in regelmäßigen Zeitintervallen[2] kontinuierlich eine vorgegebene Systemfunktion erbringen.
Eine periodische Aufgabe (T_i) ist eine Abfolge von Arbeitsaufträgen ($J_{i,j}$) mit vorgegebenen zeitlichen Eigenschaften.

☞ $T_i = (p_i, e_i, D_i, \phi_i)$

- p_i Periode (engl. *period*)
- e_i Maximale Ausführungszeit (WCET)
- D_i Relativer Termin (engl. *deadline*)
- ϕ_i Phase (engl. *phase*)

$J_{i,j} = (r_{i,j}, e_{i,j}, d_{i,j})$

[2] Nach [3, S. 40 ff] ist eine periodische Aufgabe nicht wirklich periodisch, da die Abstände zwischen den Auslösezeiten (engl. *interrelease time*) eines Arbeitsauftrags einer periodischen Aufgabe nicht der Periode selbst entsprechen müssen. Anderswo werden solche Aufgaben verschiedentlich als sporadische Aufgaben bezeichnet.

Periodische Echtzeitsysteme in der Praxis

Lassen sich Echtzeitsysteme ausschließlich aus periodischen Aufgaben aufbauen?

Rückgekoppelte Regelschleife (engl. *feedback control loop*)

initialisiere Stellwert;
initialisiere Zeitgeber und Unterbrecher;
bei Zeitgeberunterbrechung erledige /* *abtasten, regeln, steuern* */
    A/D-Wandlung der Echtzeitinstanz, Echtzeitabbild ziehen;
    Echtzeitdatenbasis aktualisieren, neuen Stellwert berechnen;
    D/A-Wandlung des Stellwerts, Echtzeitinstanz verändern;
basta

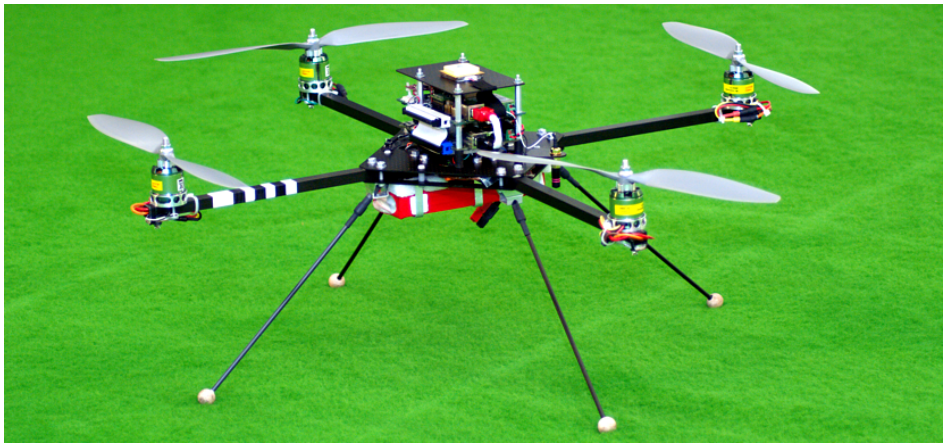
☞ Die Berechnung von Stellwerten für Aktoren ist eine typische Aufgabe von Echtzeitsystemen

- Das kontrollierte Objekt erfährt eine direkte digitale Regelung
- Regelungsanwendungen zeigen dabei eine hohe Regelmäßigkeit

→ Meist endlose Sequenz von Regelzyklen

Periodische Echtzeitsysteme in der Praxis (Forts.)

Lassen sich Echtzeitsysteme ausschließlich aus periodischen Aufgaben aufbauen?



- Periodische Regelungsaufgaben im I4*Copter*:

  alle 3 ms Sensorabtastung, Sensordatenfusion
  alle 9 ms Fluglageregelung
  alle 21 ms Höhenregelung

⚠ Die zeitliche Auflösung der Regelung richtet sich nach der Objektdynamik

Zeitbedarf im 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 [2]
  - d^{adc} Infineon TriCore ADC: 280 ns – 2,5 μs @ 10 Bit [1]
  - d^{irq} Infineon TriCore Arbitrierung: 5 - 11 Takte @ 150 MHz [1]
  - d^{OS} CiAO OS Fadenwechsel: $\leq$ 219 Takte @ TriCore (50 MHz) [5]

⚠ Alleine die Anwendung kann (fast) komplett kontrolliert werden.[3]

[3] 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:

$d^{control}$ 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 $\rightsquigarrow$ A/D-Wandlung

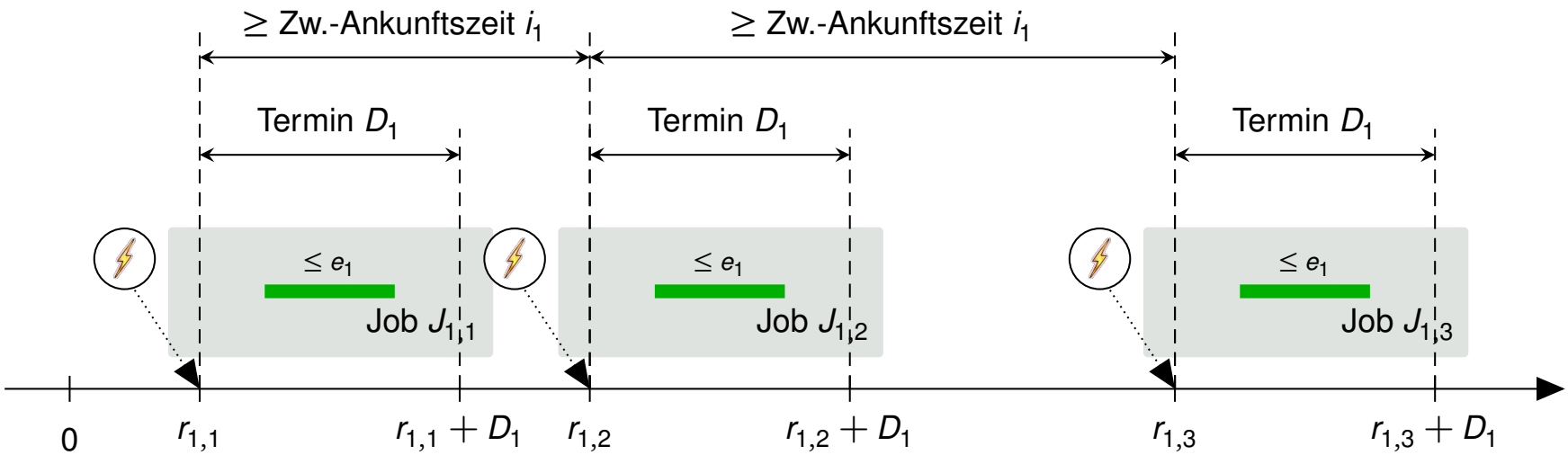
→ Nyquist-Shannon-Abtasttheorem

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

Nicht-periodische Aufgaben

Erbringen in unregelmäßigen Zeitintervallen eine vorgegebene Systemfunktion. Jede nicht-periodische Aufgabe (T_i^S) ist eine Abfolge von Arbeitsaufträgen ($J_{i,j}$) mit vorgegebenen zeitlichen Eigenschaften.

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

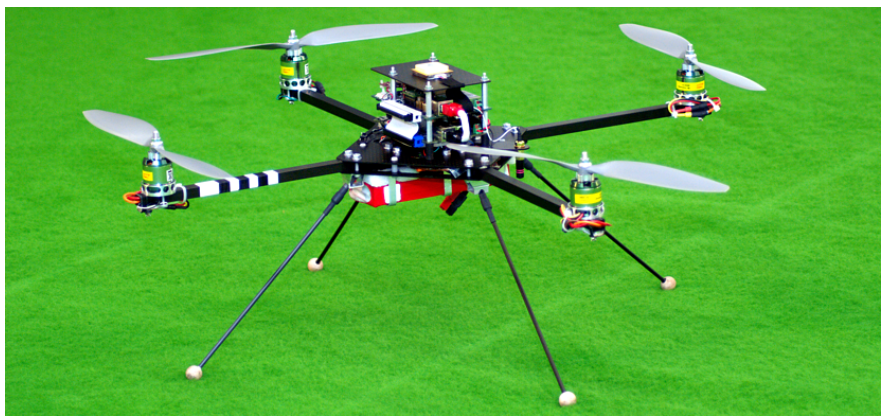


Nicht-periodische Aufgaben in der Praxis

Quelle nicht-periodischer Aufgaben

Nicht-periodische Aufgaben behandeln Ereignisse, die sich aus Zustandsänderungen des zu kontrollierenden Systems ableiten.

- Beispiele für Zustandsänderungen:
  - Mensch-Maschine-Interaktion
    - ⚠ Menschliches Verhalten ist kaum quantifizierbar
  - Kommunikation
  - Fehlerbehandlung



Beispiel I4Copter:

- Steuerkommandos
  - Empfang über die Fernbedienung
  - Schlimmster Fall: Alle 100 ms
- Telemetriedaten-Übertragung
  - Füllen eines internen Puffers
  - Schlimmster Fall: Alle 9 ms

Behandlung nicht-periodischer Aufgaben

Behandlung nicht-periodischer Aufgaben

Grundlegende Behandlungsmethoden für nicht-periodische Ereignisse lassen sich mit minimaler Unterstützung des Laufzeitsystems umsetzen. Sie sind sowohl für zeit- als auch für ereignisgesteuerte Systeme geeignet und teilweise vollständig auf Anwendungsebene umsetzbar.

- Unterbrecherbetrieb $\rightsquigarrow$ Nicht-periodische Aufgaben haben Vorfahrt
  - Ereignisbehandlung direkt in der Unterbrechungsbehandlung

  → Mittels Ausnahmebehandlungen
- Hintergrundbetrieb $\rightsquigarrow$ Periodische Aufgaben haben Vorfahrt
  - Phasen der Untätigkeit für nicht-periodische Aufgaben nutzen

  → Mittels Verdrängung
- Periodischer Zusteller $\rightsquigarrow$ Alles ist eine periodische Aufgabe
  - Abfragen nicht-periodische Ereignisse durch periodische Aufgaben

  → Einphasen nicht-periodischer Aufträge mit bekannten Mitteln

Gliederung

Die *Busy Loop*

Die wirklich einfachste Variante für die Implementierung zyklischer Systeme?

Periodische Aufgaben wiederholt in einer Schleife ausführen

```
int main(void) {
  unsigned long cnt = 0;

  while(1) {
    warte_durchlauf();

    kontrolle_start();
    aufgabe1();
    kontrolle_stop();

    if(cnt % 2 == 0) {
      aufgabe2_1();
    }

    10ms_nach_aufgabe1();

    if(cnt % 2 == 0) {
      aufgabe2_2();
    }

    ++cnt;
  }

  return 0;
}
```

- Längere Perioden lassen sich durch einen Rundenzähler ableiten
  - die Schleife definiert einen Rahmen
  - → Ausrichtendes Raster für alle Aktivitäten
- Explizite Überwachung der Rahmendauer
  - Ausführungszeit ist i.d.R. nicht konstant
- Schwierige Spezifikation zeitlichen Versatzes
  - Abhängigkeit von der tats. Ausführungszeit
- Konflikte durch lange andauernde Aufträge
  - Evtl. ist eine manuelle Aufteilung nötig
- Überwachung der Ausführungszeit
  - Schwieriger Abbruch des betroffenen Auftrags

Abarbeitung statischer Ablaufpläne

☞ Vorberechneter (statischer) Ablaufplan ↦ Ablauftabelle

- Jeder Tabelleneintrag entspricht einer Einplanungsentscheidung zu einem (vorab) bestimmten Zeitpunkt auf der Echtzeitachse
- Bei Einlastung wird ein Zeitgeber (engl. *timer*) programmiert und der Arbeitsauftrag wird gestartet
  - Kurzzeitwecker auf nächsten Entscheidungszeitpunkt stellen
  - Einzustellender Wert ist im aktuellen Tabelleneintrag zu finden

→ Ein Zeitgebersignal schaltet zum nächsten Tabelleneintrag weiter

⚠ Am Tabellenende wird wieder zum -anfang gesprungen

- Zyklischer Ablaufplan (engl. *cyclic schedule*) periodischer Aufgaben

→ Die Hyperperiode (siehe Folie **??**) gibt die Tabellengröße vor

Ereignisorientierte Einplanung

(engl. *event-driven scheduling*)

Einplanung von Arbeitsaufträgen erfolgt zu Ereigniszeitpunkten

- Ihr Auftreten ist nicht (exakt) vorhersehbar
- Ereignisauslöser sind kontrollierte Objekte/andere Arbeitsaufträge

→ Die Ereignisverarbeitung unterliegt einer gewissen Dringlichkeit

Ereignisse haben Prioritäten die dem Ereignisauslöser und/oder der Ereignisverarbeitung zugeordnet sind

Feste Zuordnung ↦ Ereignisverarbeitung/-auslöser

- Arbeitsaufträge erhalten absolute Priorität

Variable Zuordnung ↦ Ereignisverarbeitung

- Arbeitsaufträge erhalten relative Priorität

Auch prioritätsorientierte Einplanung (engl. *priority-driven scheduling*)

Prioritätsorientierte Algorithmen

Verfahren zur prioritätsorientierten Einplanung periodischer Arbeitsaufträge werden folglich in zwei Gruppen eingeteilt:

Feste Priorität (engl. *fixed priority* oder *static priority*)

- Priorität der Aufträge einer Aufgabe sind unveränderlich
- Die Aufgabenprioriät steht unabhängig von der Auslösung bzw. Beendigung von Arbeitsaufträgen fest

→ Prioritäten werden statisch zum Entwurfszeitpunkt vergeben

Dynamische Priorität (engl. *dynamic priority*)

- Priorität der Aufträge einer Aufgabe sind veränderlich
- Aufgabenprioriät variiert relativ zu anderen Aufgaben, wenn Arbeitsaufträge ausgelöst bzw. beendet werden

→ Prioritäten werden dynamisch zur Laufzeit vergeben

Einplanung gemäß Ausführungsrate

Rate $1/p_i$ einer Aufgabe T_i ist die Inverse ihrer Periode p_i

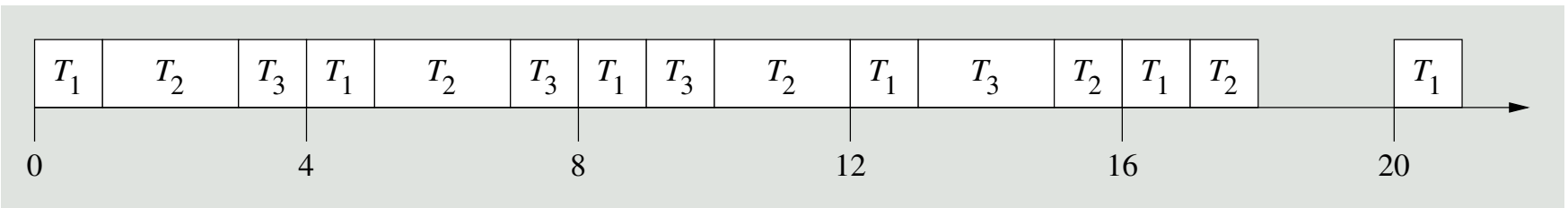
- Bezogen auf die Auslöserate von Arbeitsaufträgen in T_i

→ Je kleiner die Periode, desto höher die Priorität P_i von T_i

- Beispiel: $T_1 = (4,1)$, $T_2 = (5,2)$, $T_3 = (20,5)$
  - Perioden $p = \{4,5,20\}$, Ausführungszeiten $e = \{1,2,5\}$

⚠ Termin und Phase optional bei $D_i = p_i$ und $\phi_i = 0$

- Ablaufplan:

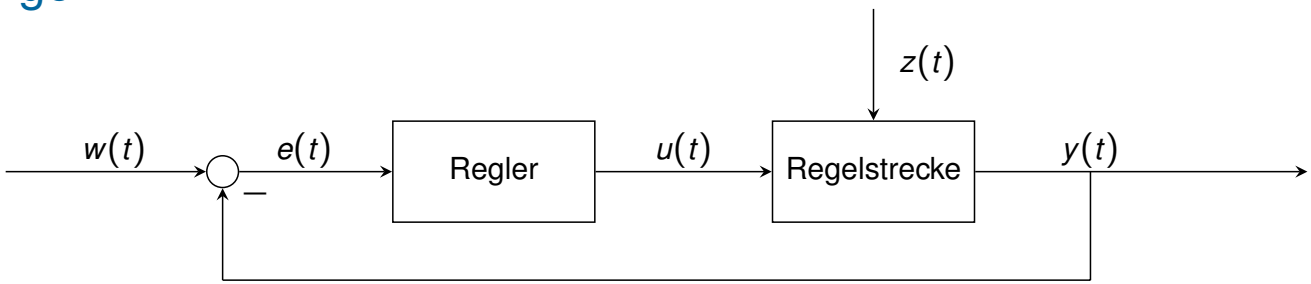


☞ Arbeitsaufträge werden in ihren Aufgabenperioden ausgeführt

→ RM lässt Prozessor bei ausführbereiten Aufträgen nicht untätig

Rangfolge (engl. *precedence*)

☞ Ausführung von Arbeitsaufträgen unterliegt häufig einer bestimmten Reihenfolge
↦ Rangfolge



- Beispiel: Regelungsanwendung
  - Signalverarbeitungsauftrag muss vor der Regelung gelaufen sein
- Beispiel: Kommunikationssystem
  - Sendeauftrag muss vor Empfangsauftrag gelaufen sein
  - Empfangsauftrag muss vor Bestätigungsauftrag gelaufen sein
- Beispiel: Anfragesystem
  - Eingabeauftrag muss vor Suchauftrag gelaufen sein
  - Suchauftrag muss vor Ausgabeauftrag gelaufen sein

⚠ Rangfolge ist oft in Datenabhängigkeiten begründet

Datenabhängigkeit (engl. *data dependency*)

Arbeitsaufträge benötigen ggf. konsumierbare Betriebsmittel

- Anzahl ist (log.) unbegrenzt: Nachrichten, Signale, Interrupts

  Produzent kann beliebig viele davon erzeugen

  Konsument zerstört sie wieder bei Inanspruchnahme

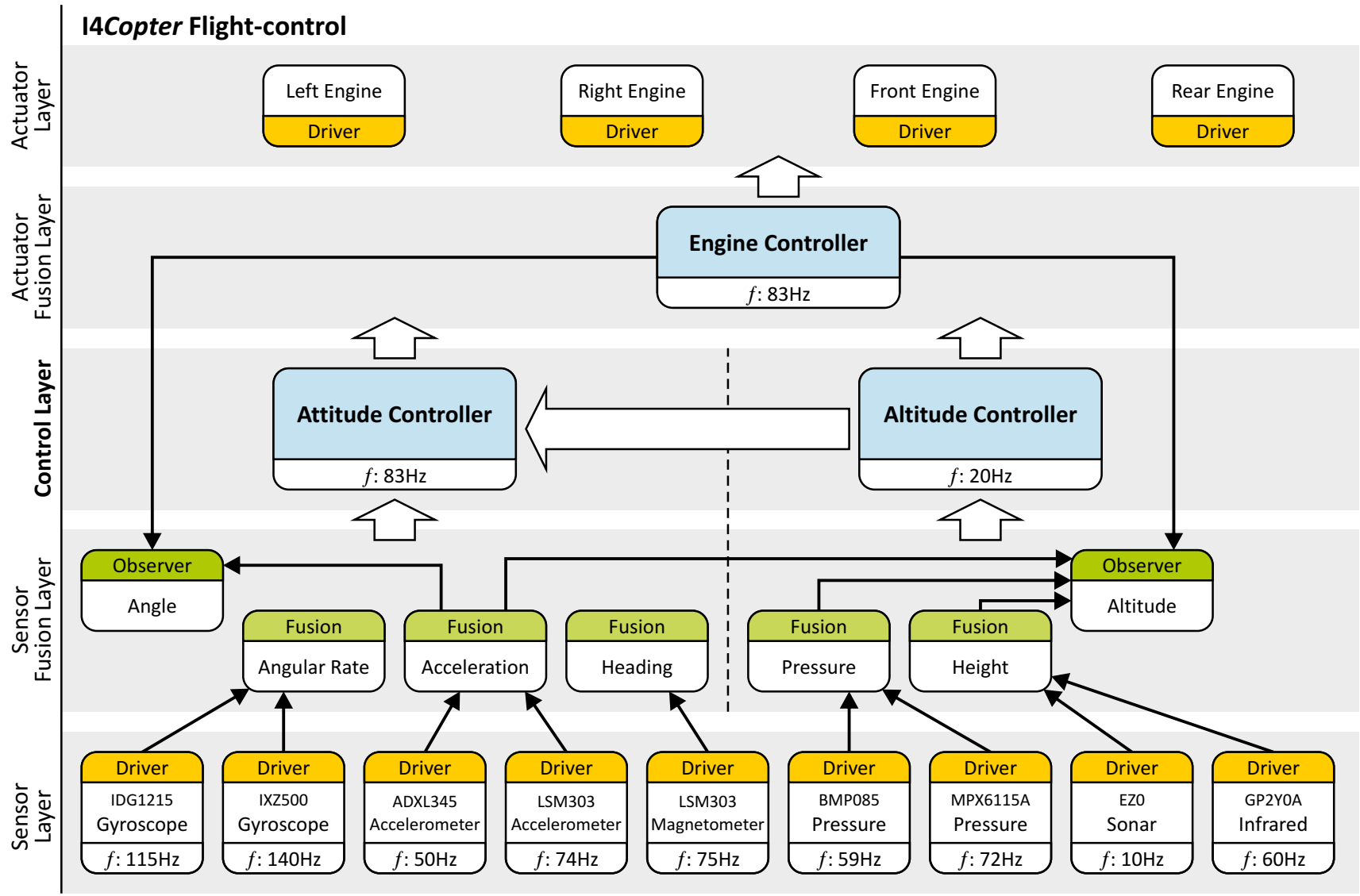
→ Zwischen ihnen besteht eine gerichtete Abhängigkeit

Produzent und Konsument sind voneinander abhängige Entitäten

- Abhängigkeit: Konsument ⟶ Produzent
  - Betriebsmittel muss vor Inanspruchnahme zunächst bereitgestellt werden
- Abhängigkeit: Produzent ⟶ Konsument (seltener)
  - Abbildung konsumierbare ↦ wiederverwendbare Betriebsmittel
  - Beispiel: begrenzter Puffer (engl. *bounded buffer*)

  → Produzent fordert ein wiederverwendbares Betriebsmittel an, welches vom Konsumenten später wieder freizugeben ist

Datenabhängigkeiten im I4Copter



Übergang zwischen zeitlichen Domänen

Produzenten und Konsumenten werden mit unterschiedlichen Raten aktiviert

- Koordinierung verschiedener zeitlicher Domänen (vgl. Folie 38)
  - Unterschiedliche Raten in den Bereichen des Echtzeitsystems

  → Gerichtete Abhängigkeiten erfordern Angleichung

- Datenaustausch zwischen Produzent und Konsument
  - Erfolgt in Abstimmung ↦ Konsument erwartet Daten
  - Aufwand abhängig von der Diskrepanz der Raten

- Typisches Vorgehen in Echtzeitanwendungen
  - Gemeinsamer Puffer als Zwischenspeicher ↦ Produzent schneller
    - Problem: Puffergröße und WCET (Abarbeitung des Rückstands)
  - Prädikation durch Beobachter ↦ Konsument schneller[4]
    - Generierung von Zwischenwerten kompensiert langsamen Produzenten
  - Letzter Wert genügt (engl. *last is best*) ↦ beidseitig
    - Verzicht auf explizite Abstimmung (simpel)
    - Alter unterliegt gewissen Schwankungen

[4] Sonderfall in der digitalen Signalverarbeitung: Zukünftige Messwerte lassen sich mittels Modellen des physikalischen Systems in gewissem Umfang vorhersagen.

Literaturverzeichnis

[1] Infineon Technologies AG (Hrsg.):
TC1796 User's Manual (V2.0).
St.-Martin-Str. 53, 81669 München, Germany: Infineon Technologies AG, Jul. 2007

[2] InvenSense Inc.:
ITG-3200 Product Specification Revision 1.4.
`http://invensense.com/mems/gyro/documents/PS-ITG-3200A.pdf`, 2010. –
Data Sheet

[3] Liu, J. W. S.:
Real-Time Systems.
Englewood Cliffs, NJ, USA : Prentice Hall PTR, 2000. –
ISBN 0–13–099651–3

[4] Lohmann, D. :
Vorlesung: Betriebssysteme, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS15/V_BS, 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*.
USENIX Association. –
ISBN 978–1–931971–68–3, 215–228