

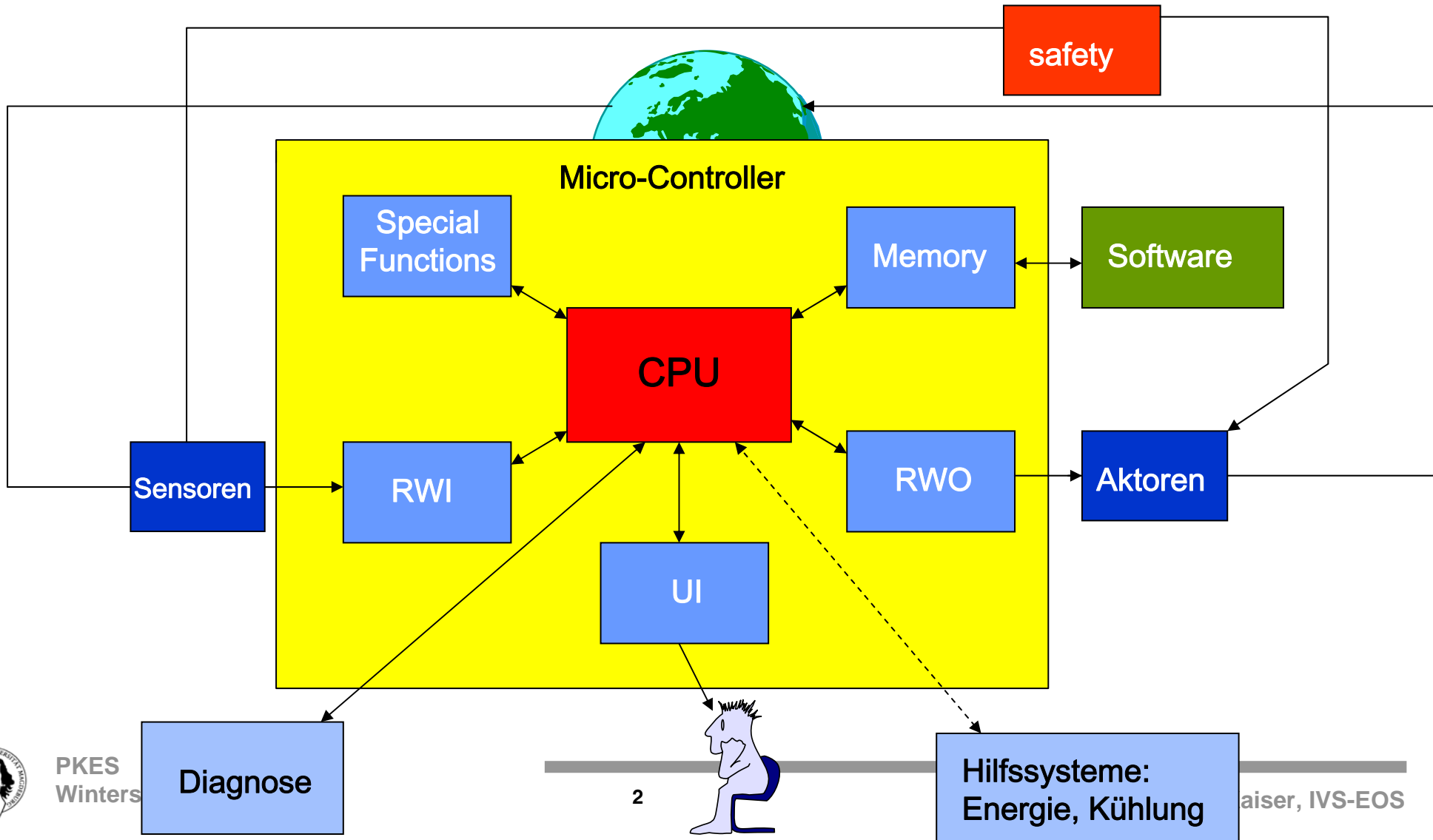
---

# Eigenschaften eines Echtzeitsystems



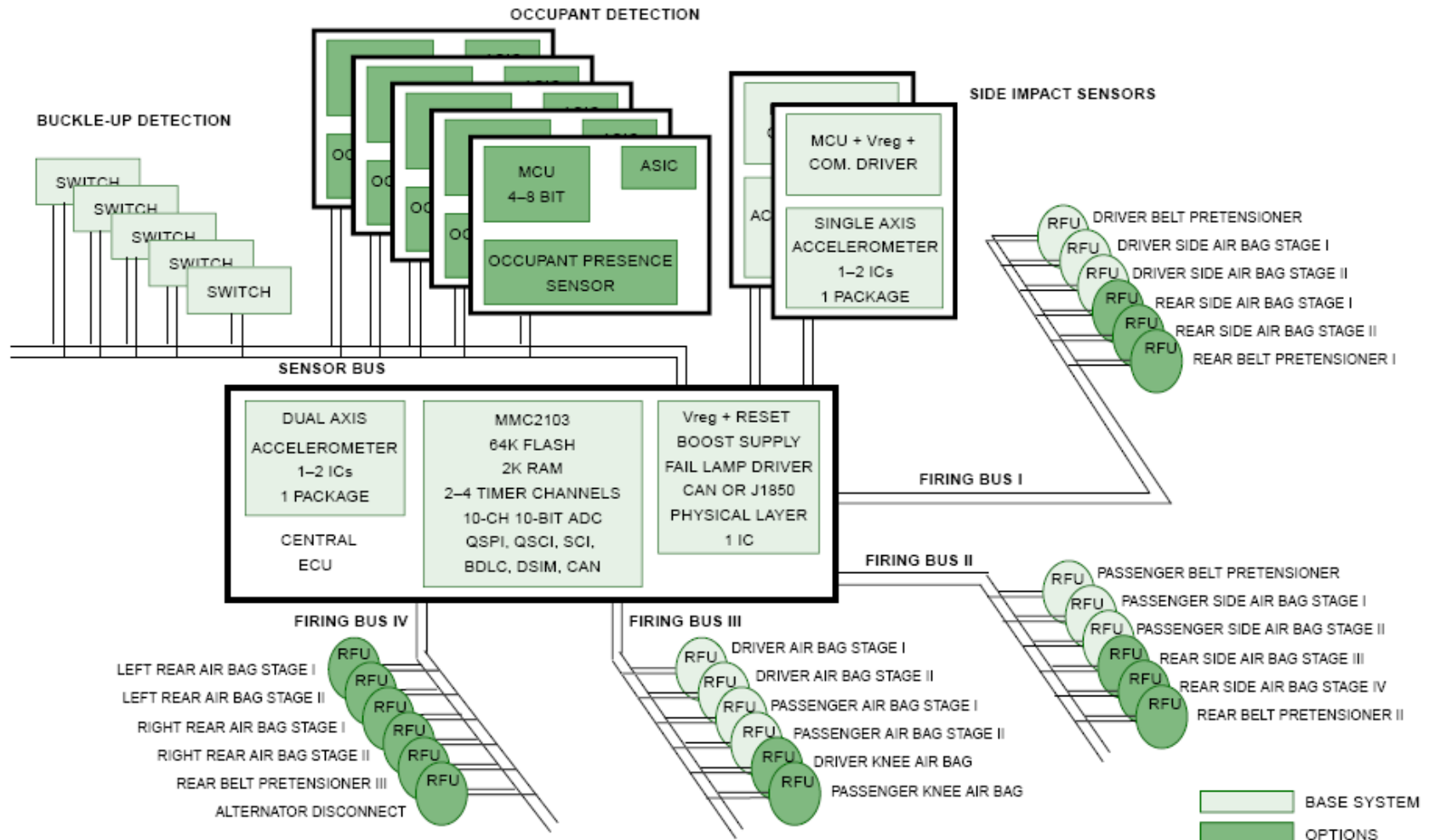
# Systemsicht eines Architekten für Kontrollsysteme:

Leistungs-Eigenschaften gemessen in: **Kosten, Time-to-Market, Kosten, Funktionalität, Kosten, Kosten,...**



Mehr Beispiele für Steuerungsaufgaben in:  
 Aufzügen, Turbinen, Flugzeugen, Autos, industrielle Automatisierung:  
 Sicherheitskritische Systeme, Echtzeitverarbeitung, verteilte Prozessoren, hohe Komplexität.

### Beispiel: verteilte Airbag Auslösung



# Was ist ein Echtzeitsystem ?

---

## Echtzeitsystem

### Def. nach DIN 443000

**Ein Betrieb eines Rechensystems, bei dem Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig betriebsbereit sind, derart, daß die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sind.**

**Die Daten können je nach Anwendungsfall nach einer zeitlich zufälligen Verteilung oder zu vorherbestimmten Zeitpunkten anfallen.**



# Was ist ein Echtzeitsystem ?

---

**Lastannahme:** definiert die angenommene Spitzenbelastung, die durch die reale Umgebung, in die das System eingebettet ist, erzeugt wird.

**!! Statistische Argumente bzgl. einer geringen Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens unabhängiger Ereignisse sind nicht zulässig. Beisp. In besonders kritischen Situationen treten meist sehr viele zeitlich korrelierte Ereignisse ein.**

**Fehlerannahme:** definiert die Art und die Anzahl der Fehler und welche Funktionalität unter dieser Annahme aufrecht erhalten wird.  
**!! Das System muß im schlimmsten Fall (worst case) Spitzenlast und maximale Anzahl von Fehlern handhaben.**

**Geltungsbereich der Annahmen:** (Assumption Coverage)  
Wahrscheinlichkeit, daß die Annahmen mit der Wirklichkeit, d.h. dem Verhalten der Umgebung, übereinstimmen



# Anforderungen an die Zuverlässigkeit (dependability requirements)

**Zeitliche  
Eigenschaften  
der Programm-  
ausführung**

**Funktionale  
Eigenschaften  
der Programme**

**Spezifikation**

**Implementierung**

**Vorhersagbarkeit  
(Predictability)**

**Lastannahme**

**Fehlerannahme**



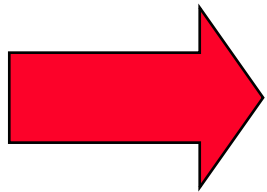
# Was ist ein Echtzeitsystem ?

---

## **Echtzeitsystem:**

Ein Echtzeitsystem hat unter einer gegebenen Lastannahme und Fehlerannahme ein funktional und zeitlich **vorhersagbares** Verhalten.

***Exakte zeitliche Vorhersagbarkeit*** für individuelle Services ist die Eigenschaft, die ein RTS von einem “Nicht-RTS” unterscheidet !



**Zeit ist ein expliziter  
Entwurfsparameter**



# Zeitliche Anforderungen

---

- **Zeitliche Gültigkeit der Echtzeitdaten.**

Wenn Daten verarbeitet oder angezeigt werden, müssen sie zeitliche Gültigkeit besitzen.

➔ Echtzeitdaten altern!

- **Maximale Antwortzeiten.**

Die maximalen Ausführungszeiten für individuelle Berechnungen (eingeschlossen Stimulus-Berechnung-Antwort-Zyklen) müssen beschränkt und bekannt sei.

- **Zeitliche Vorhersagbarkeit**

Das zeitliche Verhalten des Gesamtsystems muß in allen Situationen exakt vorhersagbar sein, insbesondere auch unter Bedingungen, die sehr selten auftreten.

➔ Planung





# Garantien und “Best Effort”

---

**Eine zeitliche Garantie bedeutet, daß für eine bestimmte Realisierung eines RT-Systems unter gegebenen Last- und Fehlerannahmen seine zeitliche Korrektheit durch analytische Methoden erwiesen wurde.**

**Garantie für individuelle Tasks - Jede garantierte Deadline wird eingehalten. Zeitfehler werden im Rahmen der Garantien behandelt.**

**In einem Best Effort System werden keine Garantien gegeben. Die zeitliche Verifikation beruht auf probabilistischen Aussagen auch im Rahmen der angenommenen Last- und Fehlerannahmen.**

**Globale Garantien für Konsistenz oder maximale Zeitfehler. Verfahren zur Behandlung von Zeitfehlern vorhanden. Meist “gracefully degradable” Funktionalität.**

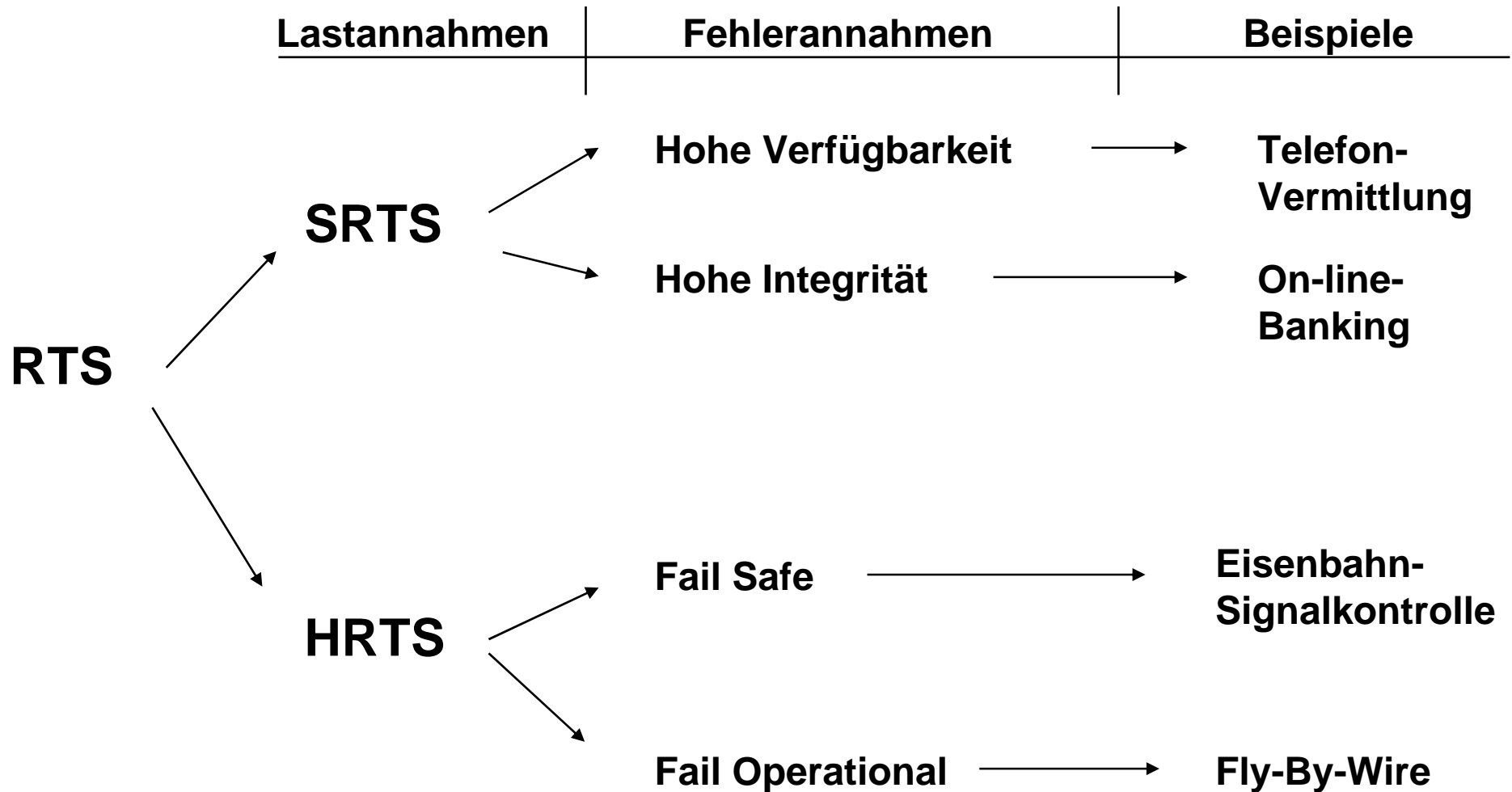


# Klassifikation von Echtzeitsystemen

---

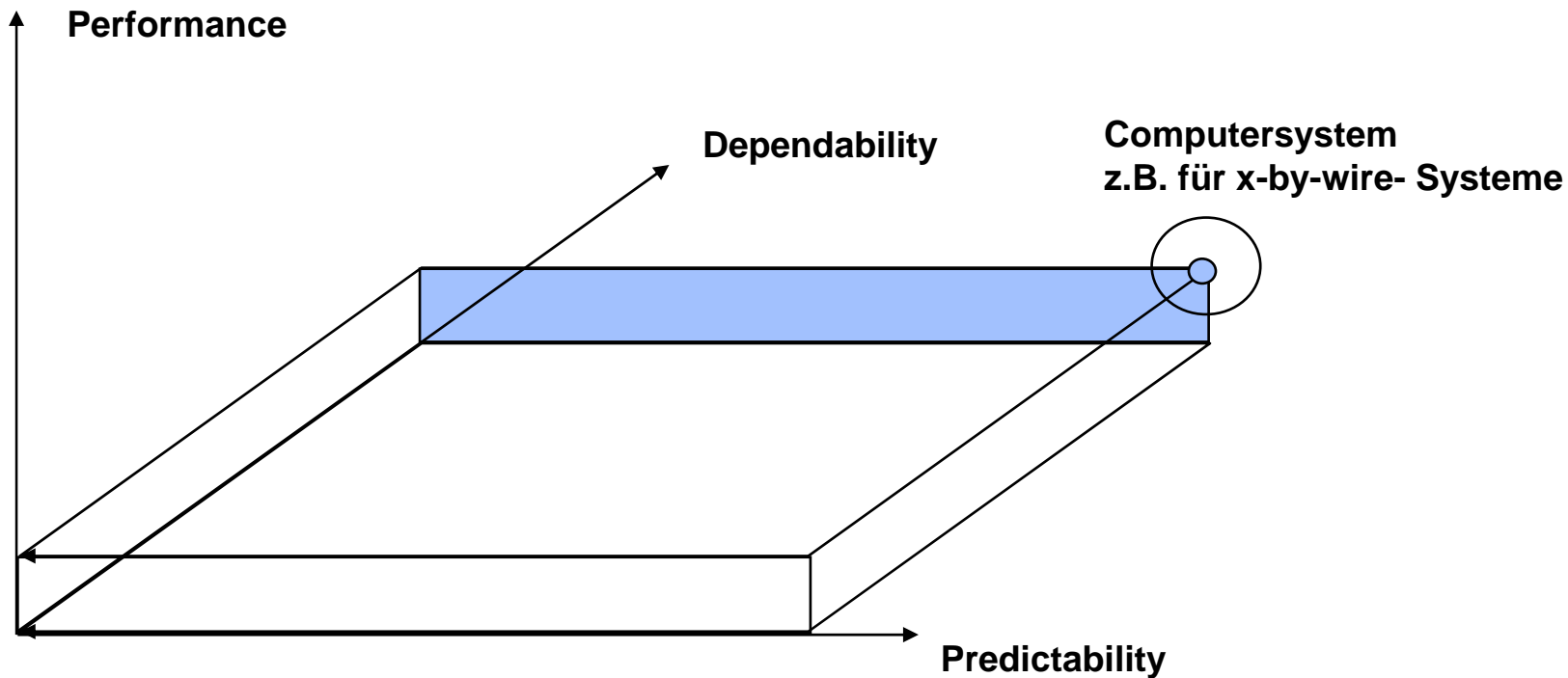
	Hard RT	Soft RT
Garantien	Steuer- und Überwachungs-Systeme	Telefon-Vermittlungs-Systeme
Best Effort	nicht sinnvoll	Multi-Media Systeme

# Klassifikation von Echtzeitsystemen



# Anforderungen an die Architektur

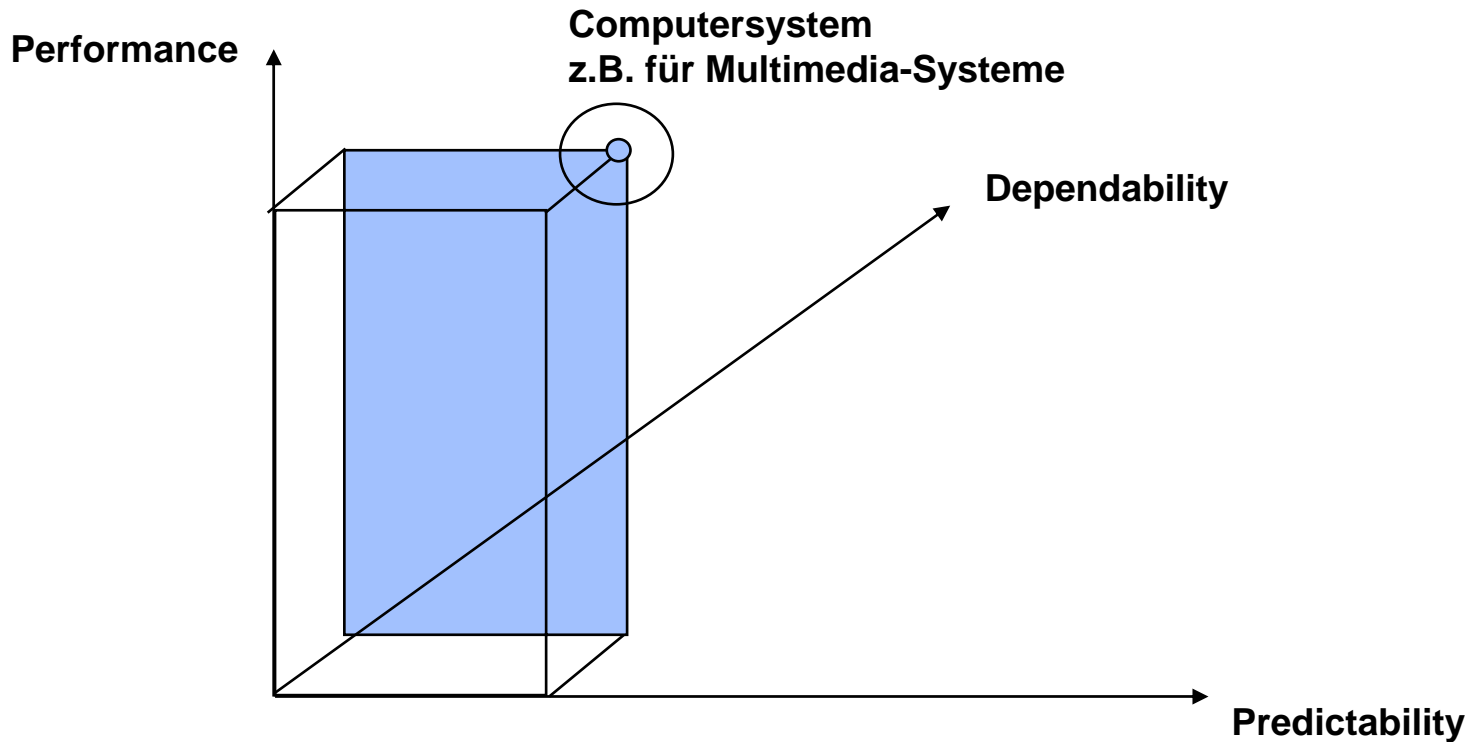
- hohe Zuverlässigkeit (Aspekte der Ausfallsicherheit und Prozeßsicherheit im Vordergrund)
- hohe Vorhersagbarkeit (individuelle Garantien unter Spitzenlastannahme )
- adäquate Leistung



# Anforderungen an die Architektur

---

- höchste Leistung
- Vorhersagbarkeit unter statistischen Annahmen
- Zuverlässigkeit: Aspekte der Wartbarkeit und Verfügbarkeit stehen im Vordergrund



---

# Wie programmieren?



# Spezifikation der Kontrolle

---

**Beispiel: Hinderniserkennung in einem Roboter**  
 **$d_1$  und  $d_2$  sind Meßwerte von einem Sensor**  
 **$s_1$  und  $s_2$  sind kritische Abstandsschranken**

**IF (  $(d_1 < s_1)$  AND  $(d_2 < s_2)$  ) THEN “ alles o.k”**  
**ELSE “ raise alarm“**

**Ist diese Spezifikation eines Kontrollstatements ausreichend für eine Realzeitumgebung ?**

**Zusätzliche Angaben:**

- In welchen Abständen wird die Distanz gemessen ?**
- Wird die Alarmsituation mit jeder Messung überprüft ?**
- Welcher maximale Zeitabstand ist zwischen Distanzänderungen und Alarm zulässig?**



# Logische und zeitliche Kontrolle:

---

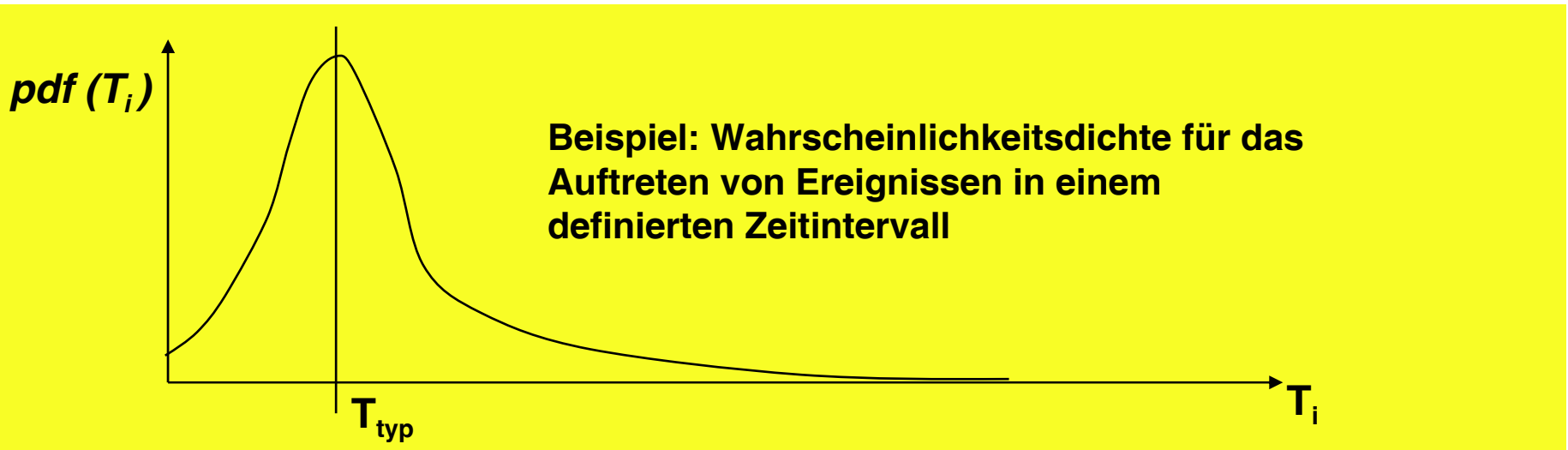
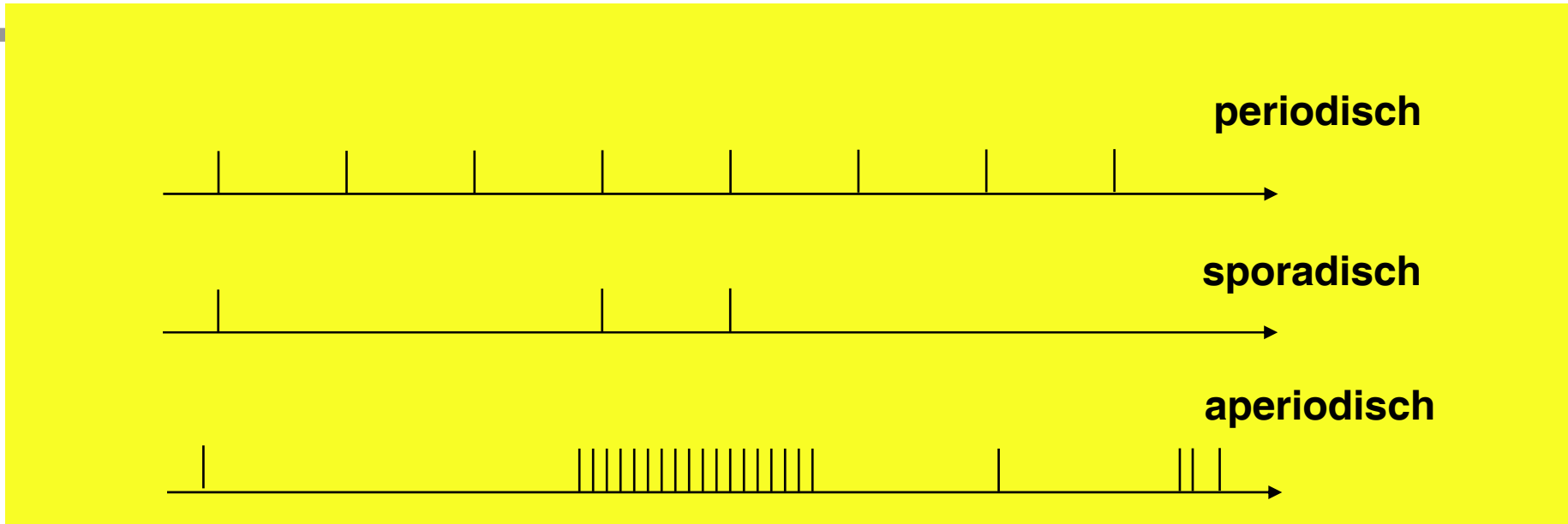
**Kontrolle bestimmt den Zeitpunkt an dem eine ausgewählte Aktion startet. In einem Realzeitsystem muß unterschieden werden zwischen:**

- **Logischer Kontrolle.** Sie definiert den Kontrollfluß in einem Programm um die spezifizierte Datentransformation zu realisieren.
- **Zeitlicher Kontrolle.** Sie bestimmt den Zeitpunkt an dem eine Task gestartet oder von einer wichtigeren Task unterbrochen wird. Zeitliche Kontrolle ist eng verbunden mit der Planung des zeitlichen Ablaufs (Scheduling).

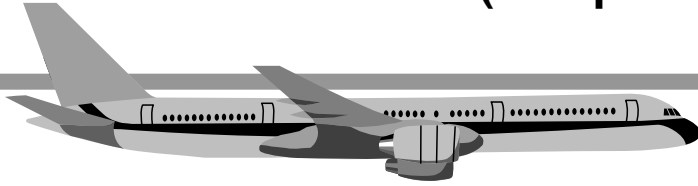




# Zeitliche Verteilung der Ereignisse

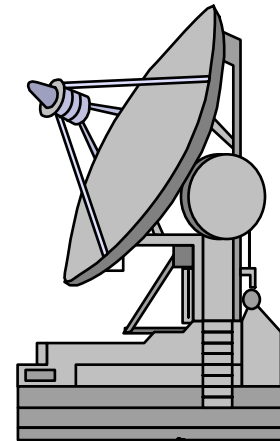


# Zeitliche Gültigkeit von Echtzeitinformationen (Temporal Consistency)



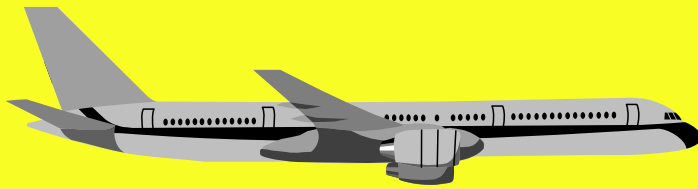
**Zeit-Wert-Einheiten  
(Time-Value Entities):**  
 $V = E(t)$   
**V:** Beobachteter Wert  
**E:** Echtzeitkomponente

**Wie lange ist die beobachtete Position des  
Flugzeugs gültig ?**

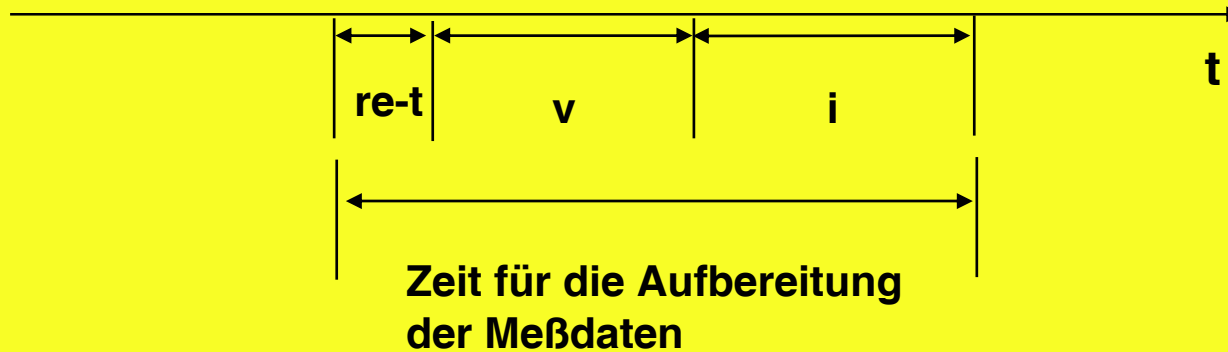


**Echtzeitdaten altern !**

# Abschätzung von Ungenauigkeiten



gemessene  
Position



Ungenauigkeiten (Jitter):

re-t : reading error  
zeitlicher (!) Meßfehler

i: imprecision  
zeitliche Varianz der  
Verarbeitung

v: variance  
Unbestimmtheit des  
Berechnungsbeginns

$$\text{Gesamtfehler } U = re-v + ce + re-t + i + v$$

re-v : Meßfehler des Positionswertes

ce: Ungenauigkeiten der Positionsberechnung

---

**Daraus ergeben sich die Aspekte:**

**1. Time of a value:**

**Wie genau kann man den Zeitpunkt einer Beobachtung bestimmen?**

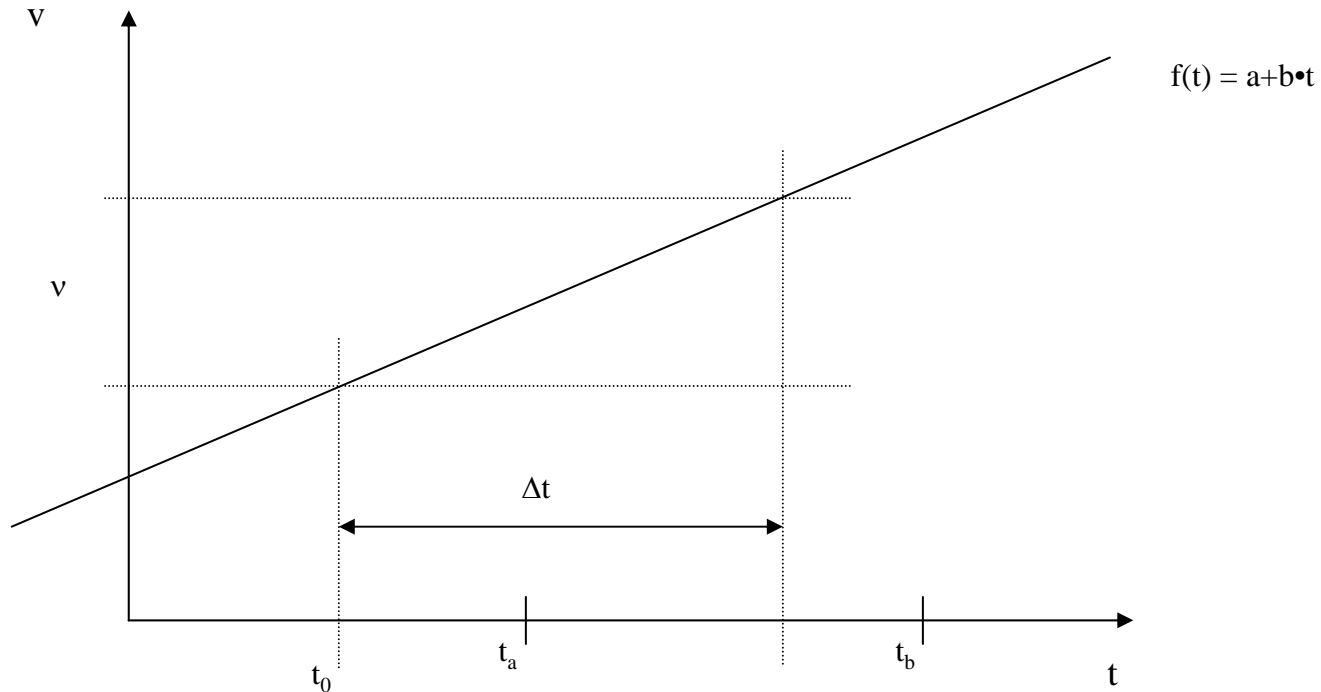
**Wie genau kann man eine Beobachtung zu einem bestimmten Zeitpunkt initiieren?**

**2. Value over time: Wie ändert sich der Wert während der Behandlung im Rechner?**



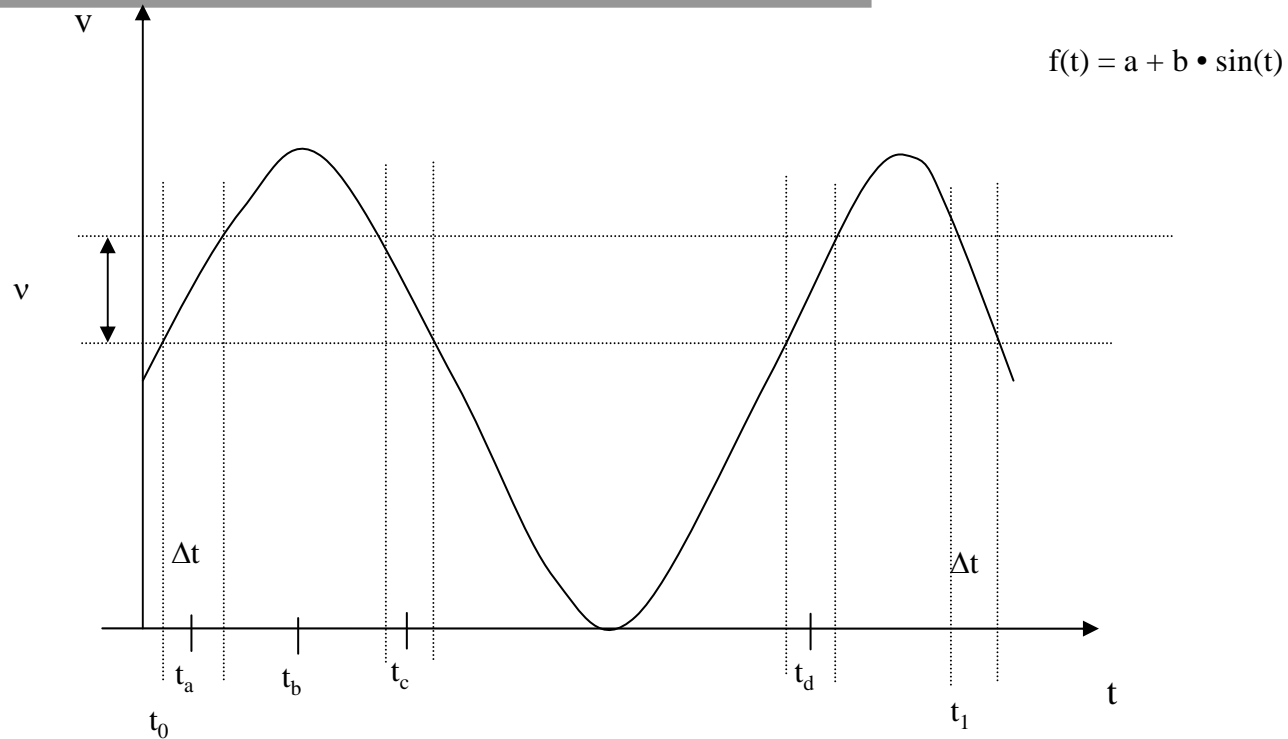
# Zeitliche Gültigkeit von Sensordaten

---



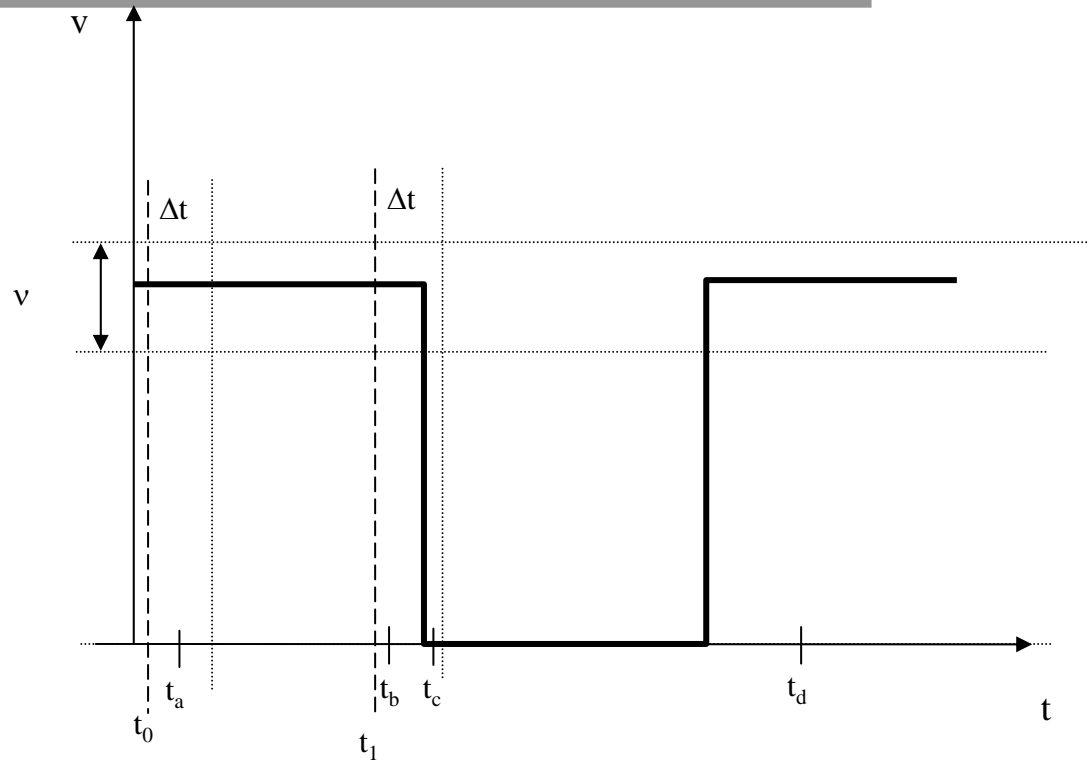
$t_0$  : point of observation  
 $\Delta t$ : temporal validity interval  
 $t_a$  : temporally consistent  
 $t_b$  : temporally not consistent

# Zeitliche Gültigkeit von Sensordaten



$t_0, t_1$  : points of observation  
 $\Delta t$ : temporal validity intervals  
 $t_a, t_c, t_d$ : temporally consistent  
 $t_b$  : temporally not consistent

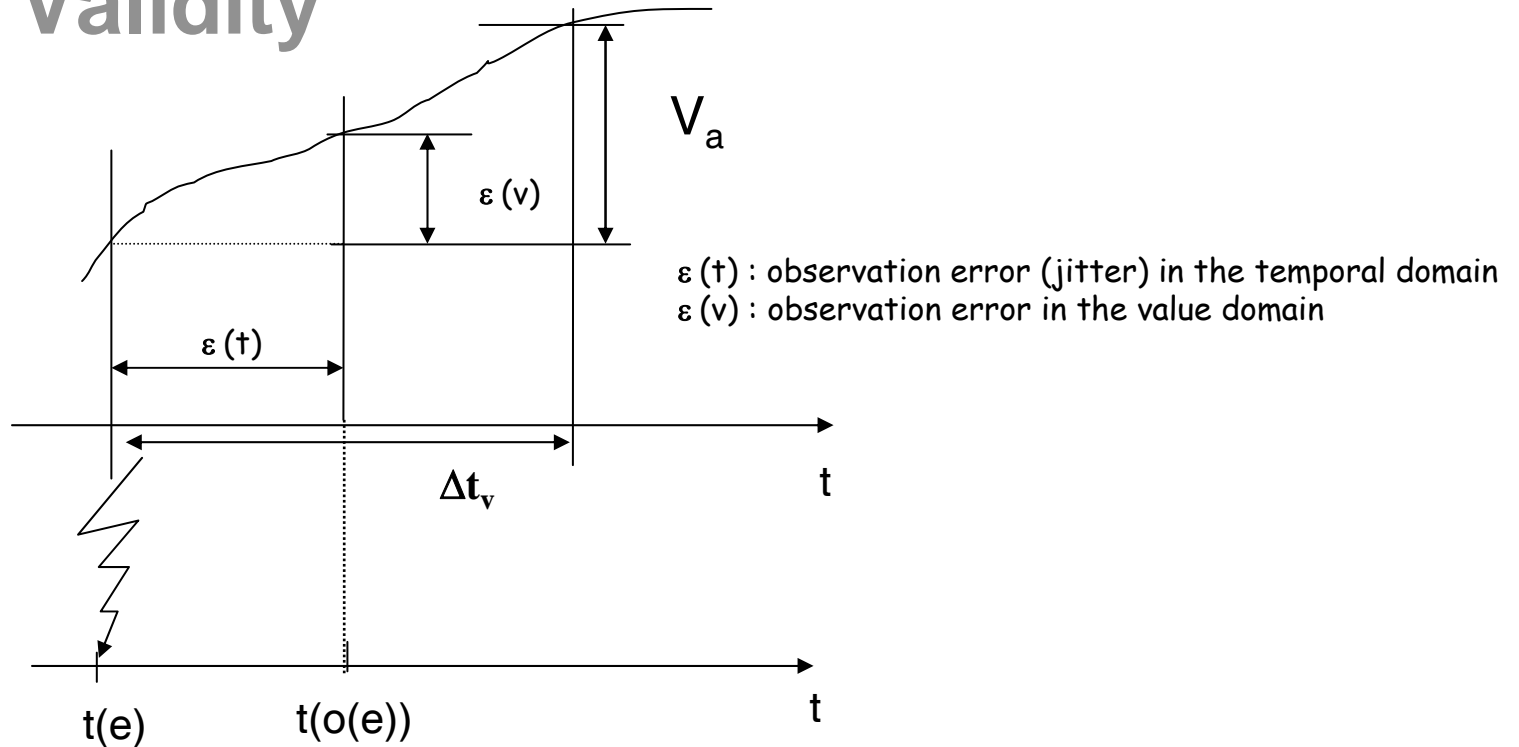
# Zeitliche Gültigkeit von Sensordaten



$$f(t) = \begin{cases} 1 & \text{if door is open} \\ 0 & \text{if door is closed} \end{cases}$$

$t_0, t_1$  : points of observation  
 $\Delta t$ : temporal validity intervals  
 $t_a, t_b, t_d$ : temporally consistent  
 $t_c$  : temporally not consistent

# Temporal Validity



given a max. acceptable error in the value domain  $V_a$ , an observation is valid for all  $t(o(e))$  in the time interval  $\Delta t_v$  iff:

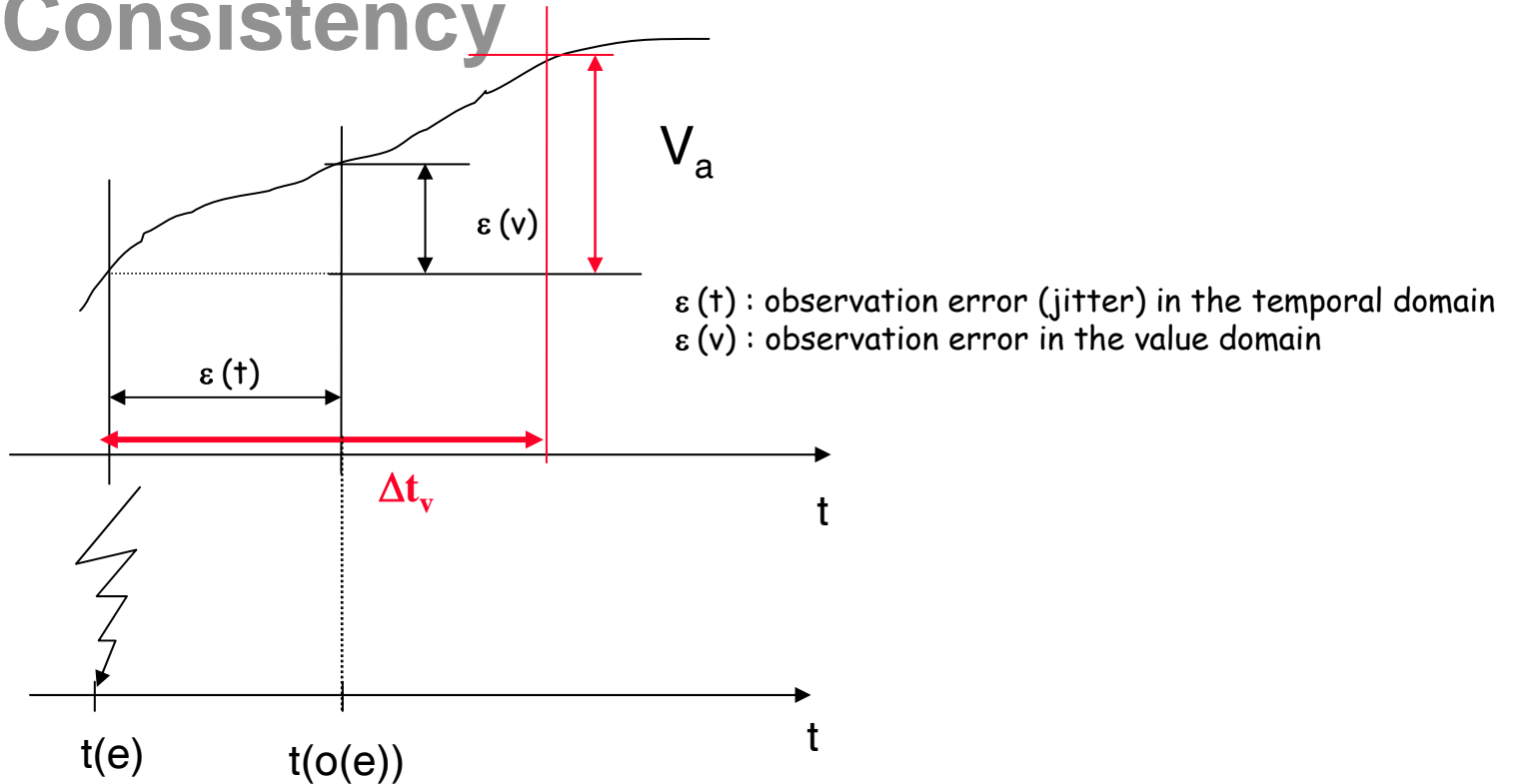
$$|v_{t(e)} - v_{t(o(e))}| \leq V_a$$

## Temporal Validity denotes a Time Interval





# Temporal Consistency



given a max. acceptable error in the value domain  $V_a$ , an observation at  $t(o(e)) \geq t(e)$  is consistent iff:

$$|v_{t(e)} - v_{t(o(e))}| \leq V_a$$

**In the temporal validity interval all observations are temporally consistent.**



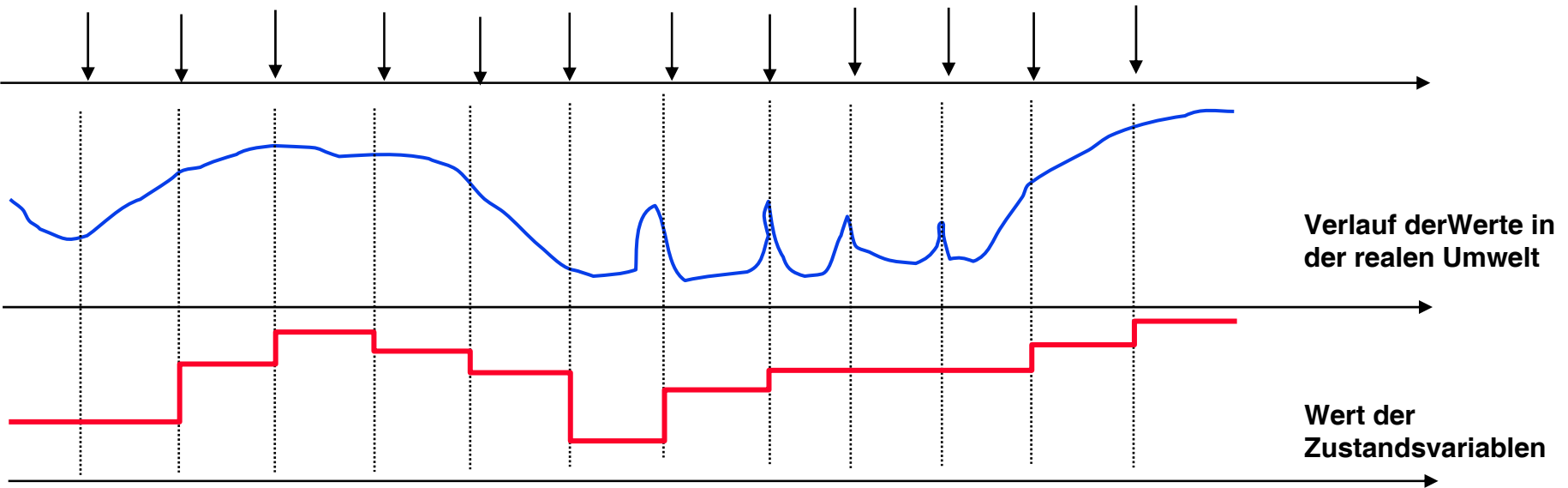
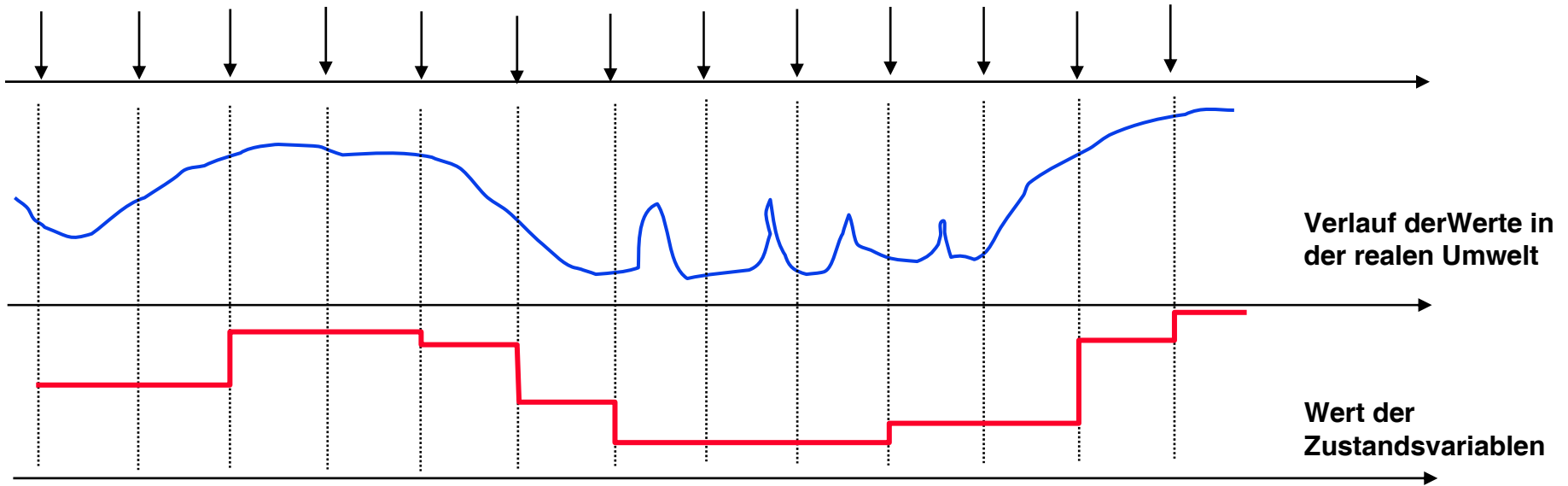
# Wie können Objekte der realen Welt im Rechner dargestellt werden ?

---

## Unterscheidung zwischen:

- **Wert**, der eine Bedeutung in der physischen Welt hat,
- **Repräsentation** des Wertes, die eine Bedeutung im Rechner hat,
- **Struktur**, in der der Wert oder die Repräsentation gespeichert und verarbeitet wird.

# Vorgänge in der realen Welt und ihre Repräsentation



# Realzeitkomponenten und Realzeitobjekte

---

**Def.:** Eine Realzeitkomponente (Real-Time Entity RTE) ist eine Größe der „realen Welt“, d.h. im weitesten Sinne, des technische Prozesses. Die Änderung einer RTE ist eine Funktion der Zeit.

**Eigenschaften:** kontinuierlich  
diskret

**Def.:** Eine Realzeitrepräsentation (Real-Time Image RTI) ist die Repräsentation einer RTE über die der Zustand einer RTE erfasst wird oder über die eine Zustandsänderung der RTE erwirkt wird.

**Eigenschaften:** Ein RTI ist zu einem bestimmten Zeitpunkt gültig, wenn es sowohl in der Werte- als auch in Zeitdomäne eine adäquate Repräsentation der RTE darstellt.

- RTIs sind nur in einem spezifizierten Zeitintervall gültig
- RTIs basieren 1. auf einer **Beobachtung** oder 2. der **Annahme über einen Zustand** (Beisp. 1. Sensordaten, 2. Annahme über die Stellung eines Motors)
- RTIs können im Rechner als RTO gespeichert werden oder außerhalb des Rechners in einem Aktuator.

**Def.:** Ein Realzeitobjekt RTO ist die Datenstruktur für ein RTE oder RTI innerhalb des Computers.



# Echtzeit-Transaktion (ET)

---

## Kapselung der Aktivitäten zwischen Stimulus und Reaktion

- **ET umfaßt die Wert- und Zeitdimension einer Berechnung.**
- **Eine ET kann mit der intendierten Funktion oder mit einem sicheren Ausnahmezustand abschließen.**
- **Da meist eine Wirkung auf das Umfeld beabsichtigt ist, liegt das Commit der ET normalerweise innerhalb der ET.**
- **Wenn der Zeitpunkt des Commits am Ende der ET liegt, kann die beabsichtigte Wirkung nicht mehr beobachtet werden.**

**Wie bei einer DB-Transaktion dient das Commit dazu, den h-state zu reduzieren. Bei einer DBT ist dies möglich, wenn die korrekten Resultate einer Berechnung stabil gespeichert sind. Ist bei einer ET eine Wirkung auf das Umfeld beabsichtigt, muß noch überprüft werden, ob diese tatsächlich stattgefunden hat. Vorher kann eine ET nicht abgeschlossen werden!**

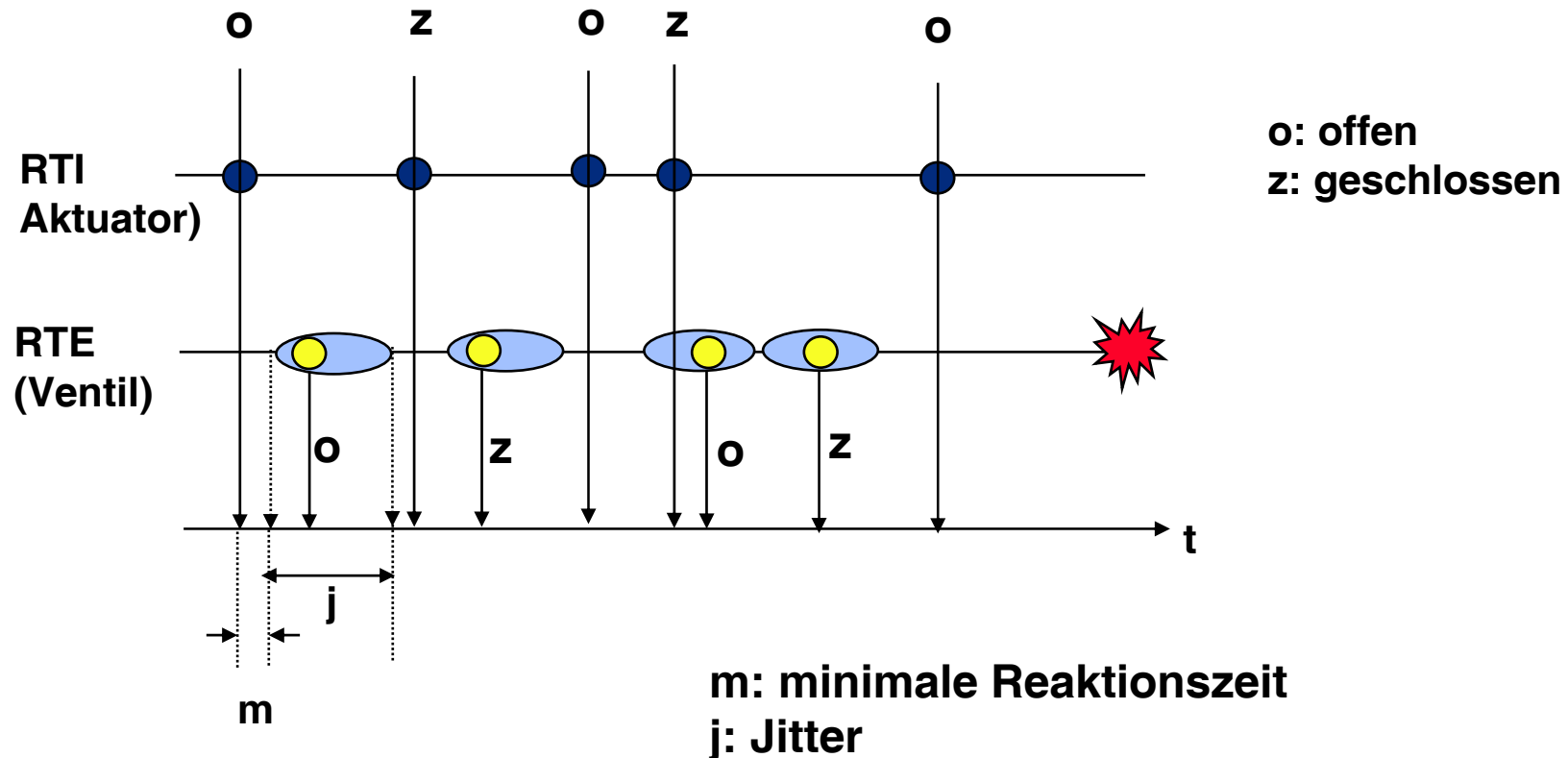
**Beisp.: Geldautomat, Three Miles Island**



# Beispiel für den Zusammenhang zwischen RTE und RTI

Ein RTI ist entweder nur beschreibbar (write-only) oder nur lesbar (read-only) aber nicht beides !!

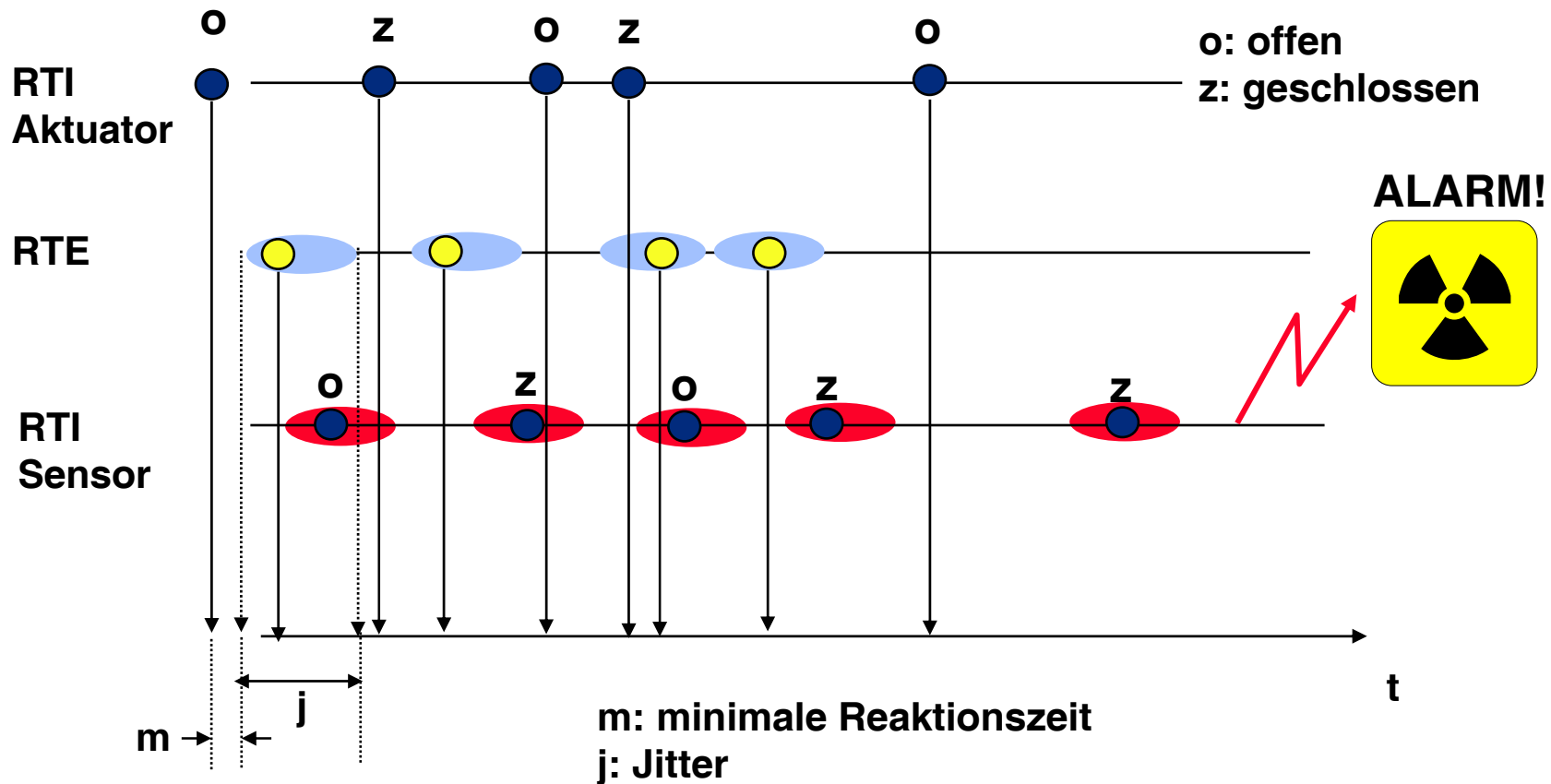
## Beispiel: Ventil



# Sensorische Rückkopplung erlaubt Überprüfung



Die RTE "Ventil" wird durch zwei RTIs repräsentiert, einmal auf der sensorischen und auf der aktorischen Seite.



# Zeitliche Kontrolle:

---

Prinzipiell zwei unterschiedliche Bedingungen:

- **Zeitgesteuert:** Ein periodisches Kontrollsignal wird von dem Fortgang einer Uhr gesteuert. TTA Time Triggered Architecture
- **Ereignisgesteuert:** Ein Kontrollsignal wird beim Eintreten eines internen oder externen Ereignisses generiert. ETA Event Triggered Architecture.

Quellen für Kontrollsignale:

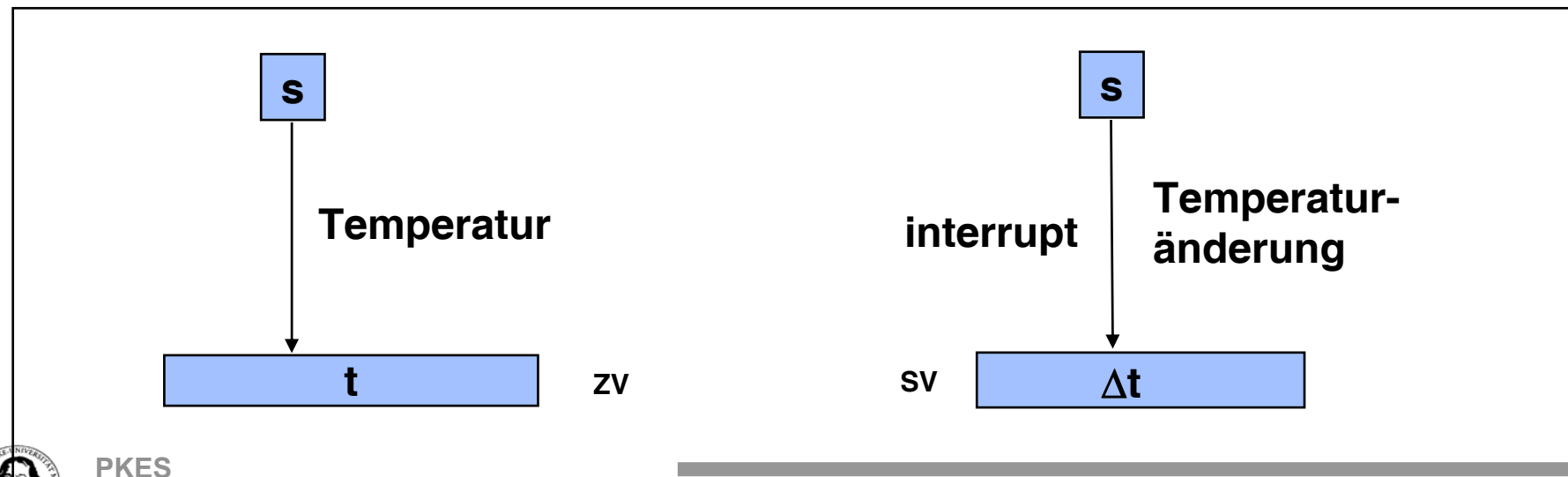
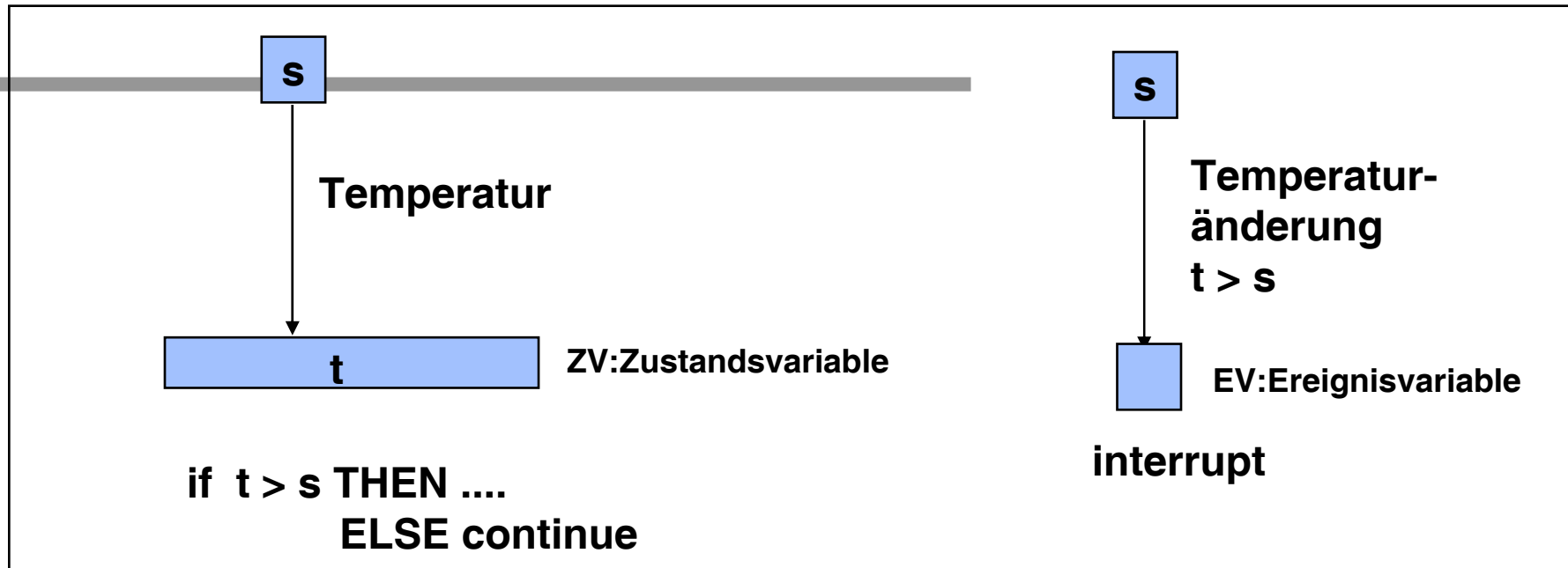
- Realzeituhr
- Eine vorhergehende Task (Precedence Task)
- Ein externes Ereignis (Interrupt)



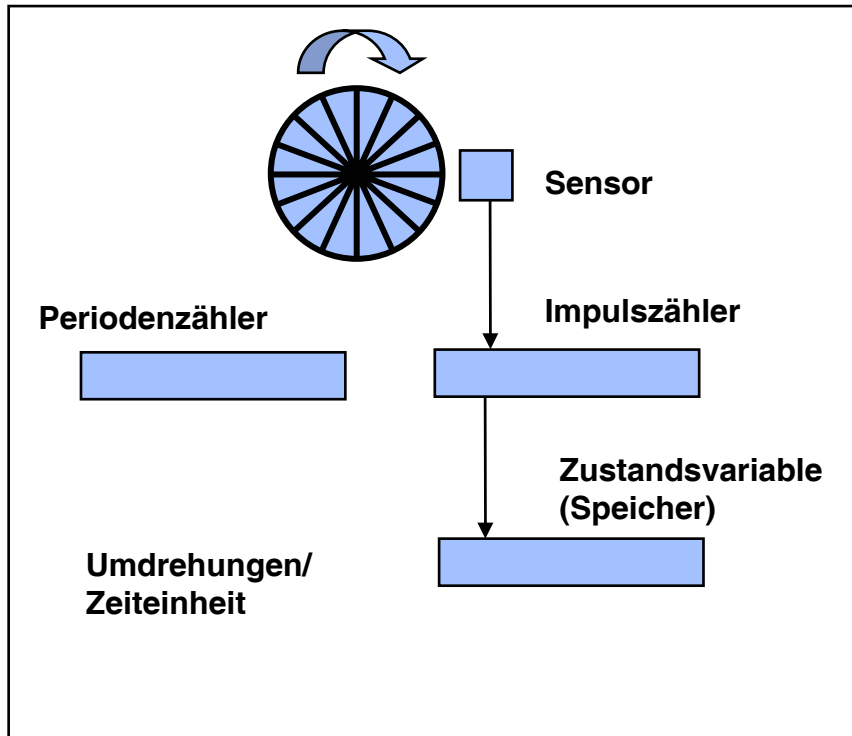




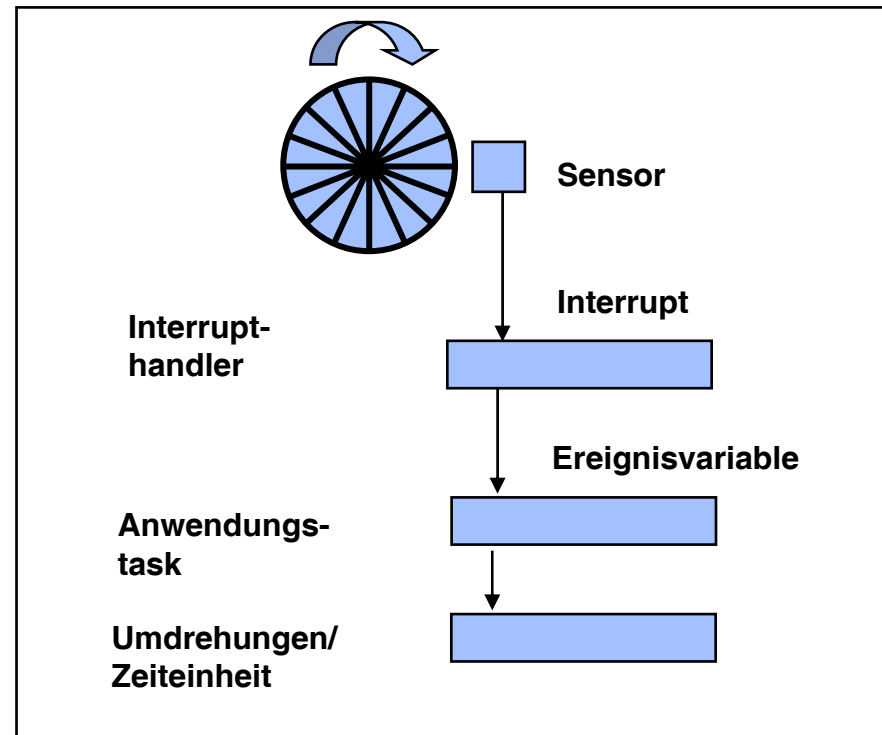
# Zustandsbasiertes Modell vs. ereignisbasiertes Modell



# Zustandsvariable vs. Ereignisvariable:



Eine Zustandsvariable enthält die Repräsentation eines temporären Systemzustands. Sie besitzt Gültigkeit, bis sie von einem neuen Zustand überschrieben wird.

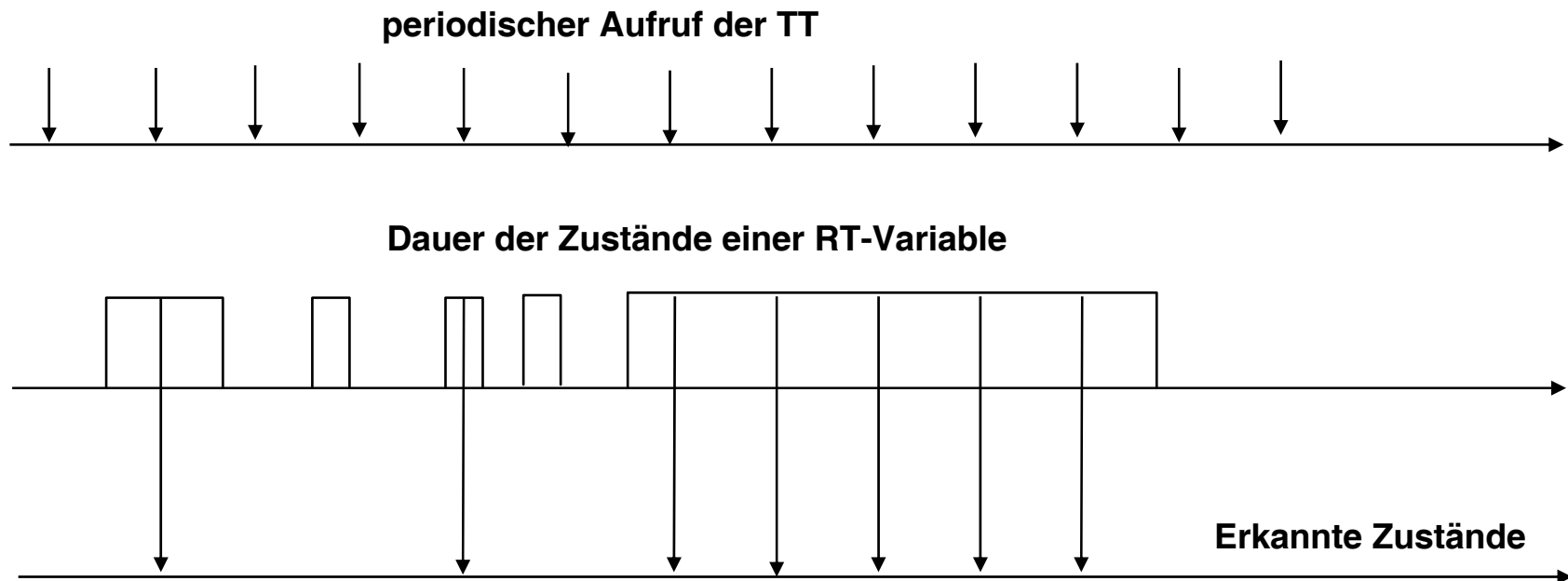


Eine Ereignisvariable signalisiert das Auftreten eines Ereignisses (Zustandsänderung). Sie besitzt prinzipiell unbegrenzte Gültigkeit, da sie nicht überschrieben werden darf. Jede individuelle Ereignisvariable muss für die "Geschichte" des Systems berücksichtigt werden.

# Zeitgesteuertes Verfahren: Trigger Task (TT)

Eine periodische TT wertet ein Prädikat (Triggerbedingung) auf einer Menge temporär gültiger RT-Variablen aus. Das Ergebnis einer TT ist:

- ein Kontrollsignal, das eine andere Task aktiviert
- *oder*
- eine neue RT-Variable

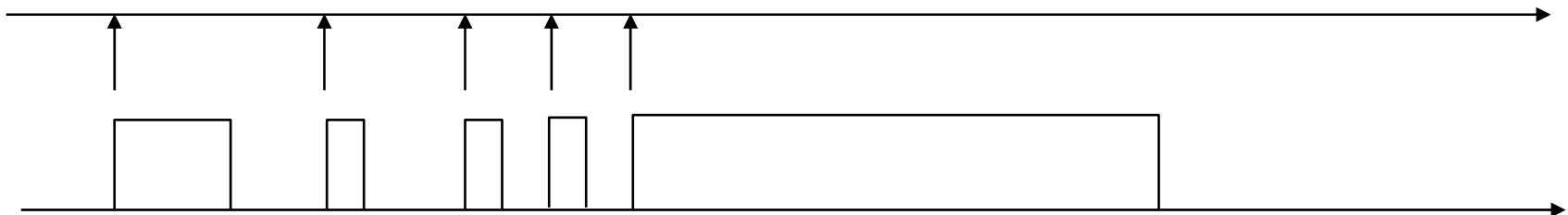


Es können nur Zustände zuverlässig beobachtet werden, deren Dauer länger ist, als die Granularität der TT. Kurzlebige Zustände müssen zwischengespeichert werden.

# Ereignisgesteuerte Verfahren: Interrupts

**Def.:**  
Ein Interrupt ist eine asynchron zur Berechnung auftretende Anforderung für eine bestimmte Task Aktivierung, die durch ein externes Ereignis hervorgerufen wird. (Diese Definition schließt synchrone Software Interrupts, Traps und Exceptions aus.)

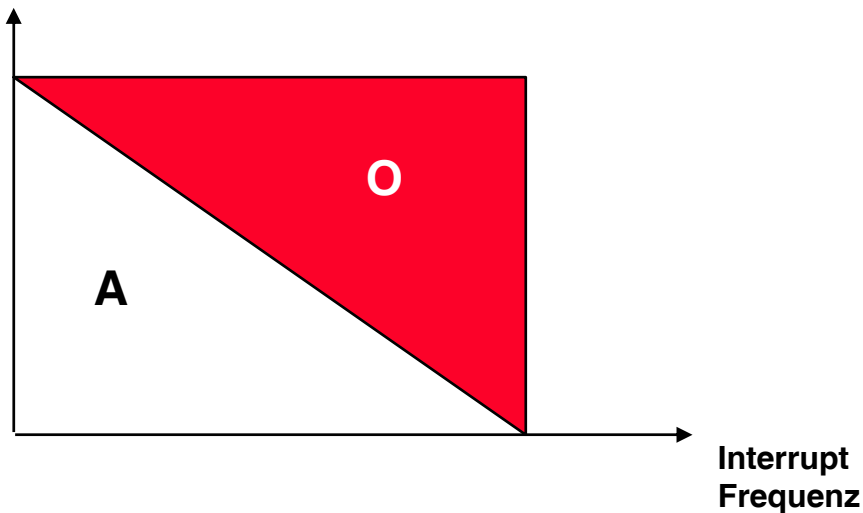
**Interruptverarbeitung kann als Polling auf der Hardwareebene ohne Beanspruchung des Prozessors gesehen werden. Nach jeder Ausführung einer Maschineninstruktion wird geprüft, ob eine Interruptanforderung vorliegt.**



# Software Overhead für die Interruptverarbeitung

---

**O:** benötigte CPU-Kapazität für den Verwaltungsaufwand bei der Interruptverarbeitung  
**A:** verfügbare Zeit für anwendungsspezifische Aufgaben



## Folgerungen:

- Anzahl der Interrupts muß beschränkt werden
- Zeit für den Verwaltungsaufwand muß möglichst klein sein

# Interne und externe Zustandsspeicherung

---



PP: physischer Prozeß



Wie verhalten sich die unterschiedlichen Verfahren bei Störungen ?

# Vergleich von ereignisgesteuerten und zeitgesteuerten Verfahren

---

	<b>Interrupt</b>	<b>Trigger Task</b>
<b>Verzögerung</b>	<b>Int. Antwortzeit</b>	<b>Periode</b>
<b>Kontrolle</b>	<b>extern</b>	<b>intern</b>
<b>Aufwand Abfrage</b>	<b>null</b>	<b><math>1/\text{Periode} * TT</math></b>
<b>Aufwand Verarbeitung</b>	<b>variabel</b>	<b>konstant</b>
<b>Unterbrechung</b>	<b>jederzeit</b>	<b>vorhersagbar</b>
<b>Speicherelement</b>	<b>intern</b>	<b>extern</b>
<b>Triggerbedingung</b>	<b>einfach</b>	<b>komplex</b>
<b>Vorhersagbarkeit</b>	<b>gering</b>	<b>hoch</b>





# Example: Ignition Control

---

Consider the control of the ignition point by continuously sampling the position of the crank shaft. At 10.000 rpm/min we have 166 rpm/sec. If 1° of position accuracy is required, we need  $166 \times 360 = 60.000$  sampling points/second, meaning that the sampling interval is below 17  $\mu$ sec.

If there would be a sensor which detects the position of the crank shaft with a sufficient accuracy, the system would have to process 166 events/second, i.e.  $\sim 1$  event/6 millisecond. The problem is that the system must be able to respond to an event within 17  $\mu$ sec to keep the position point sufficiently precise.

If the motor runs at 1000 rpm, the sampling rate is still 60.000/sec in the TT approach. In the event triggered approach it goes down to  $\sim 17$  events/sec = 1 event/58 ms which now have to be serviced within 166  $\mu$ sec.

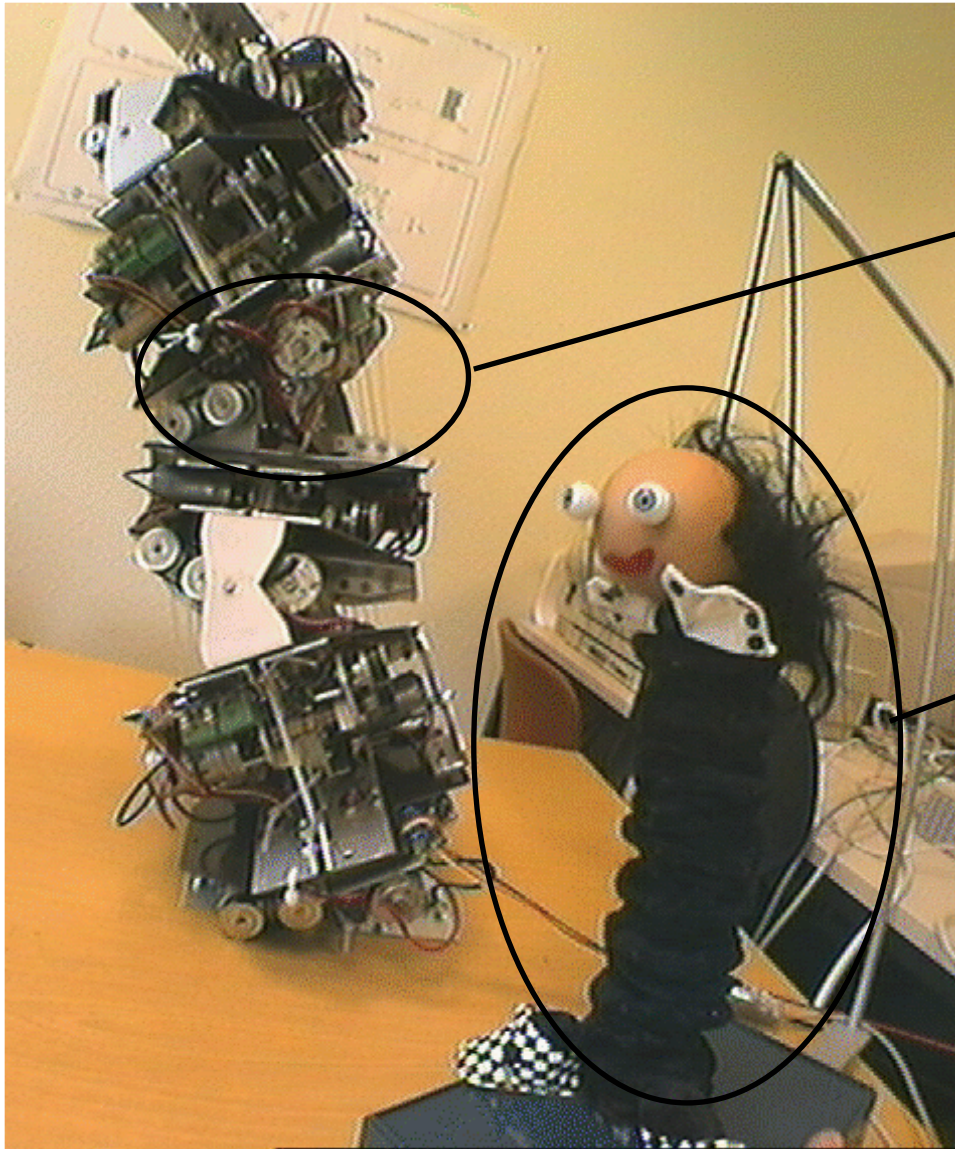
**Overhead:** Service time is 10 $\mu$ s,

**TT:** 58% constant load

**ET;** at 10000 rpm the load is 0,16%, at 1000 rpm the load is 0,016%



# Example: Robot Control



**single  
CAN-connected  
robot-element**  
(the prototype consists  
currently of 8 elements)

**Input-Sensor  
Remote Control**



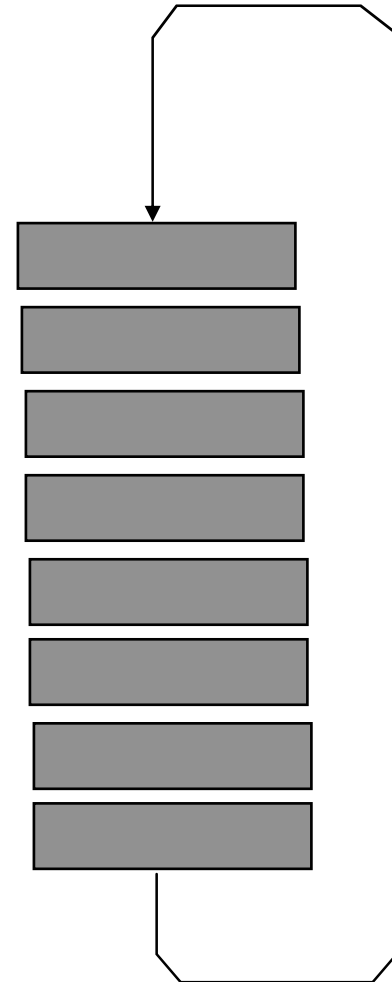
# Einfache Kontrollschleife

---

```
LOOP {  
  for( i = 0; i <= 7; i++) {  
    NomPos = Read ( InputSensor [ i ] );  
    RealPos  = Read ( RobEI [ i ] );  
  
    if( NomPos == RealPos) StopMotor(RobEI [ i ]); else  
    if(NomPos <RealPos)   StartMoveLeft(RobEI [ i ]); else  
                          StartMoveRight(RobEI [ i ]);  
  }  
}
```

**Kontrollprogramm für eine sensomotorische Einheit** 

**Die Gesamtschleife ist zeitkritisch daraus folgt, daß jeder Befehl der Schleife zeitkritisch ist.**



# Einfache Kontrollschleife

**8 Robot-Elements => 8 Sensor-Elements**  
typical duration of a movement:  $> 200 \text{ ms}$ ,  $< 3 \text{ s}$   
(dependent on Motor Characteristics)

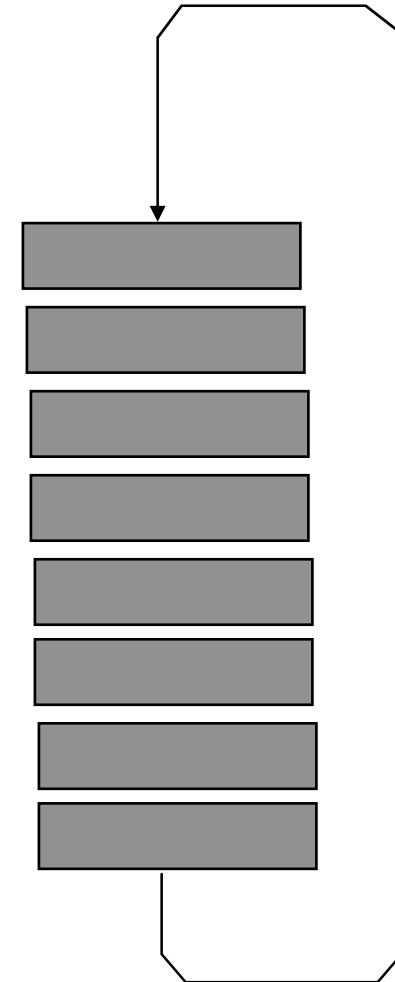
## Single Loop:

shortest duration of movement (cycle time)  $\sim 200 \text{ ms}$

=> WCET for single Sensor/RobEI-Control:  $\sim 25 \text{ ms}$

WCET for StopMove:  $16 \text{ ms}$

=> polling the input sensor is time critical:  
 $\text{Read}(\text{InputSensor}) < 10 \text{ ms}$



**shortest cycle:  $25\text{ms} \times 8 = 200 \text{ ms}$**

# Dynamische Kontrolle

```
class RobEI { ...  
  Task InputSens ( ... );  
  Task RobContr ( ... );  
}
```

```
InputSens {  
  LOOP {  
    NomPos = Read ( MyInputSensor );  
    RealPos = Read ( MyRobEI);  
  
    if( NomPos has changed)  
      resume RobControl;  
    delay ( 200 );  
  }  
}
```

```
RobControl  
{  
  
  LOOP {  
    ComputeMoveDurationAndDirection ( );  
    S_TIMER = NOW + MoveDuration;  
    MOVE_MOTOR  
      StartMove( Direction );  
      suspend ( );  
    CONTROL  
      StopMove ( )  
    END;  
    suspend ( );  
  }  
}
```



---

**8 Robot-Elements => 8 Sensor-Elements**

**typical duration of a movement: > 200 ms, < 3 s**

**(dependent on Motor Characteristics)**



**Multi-Tasking:**

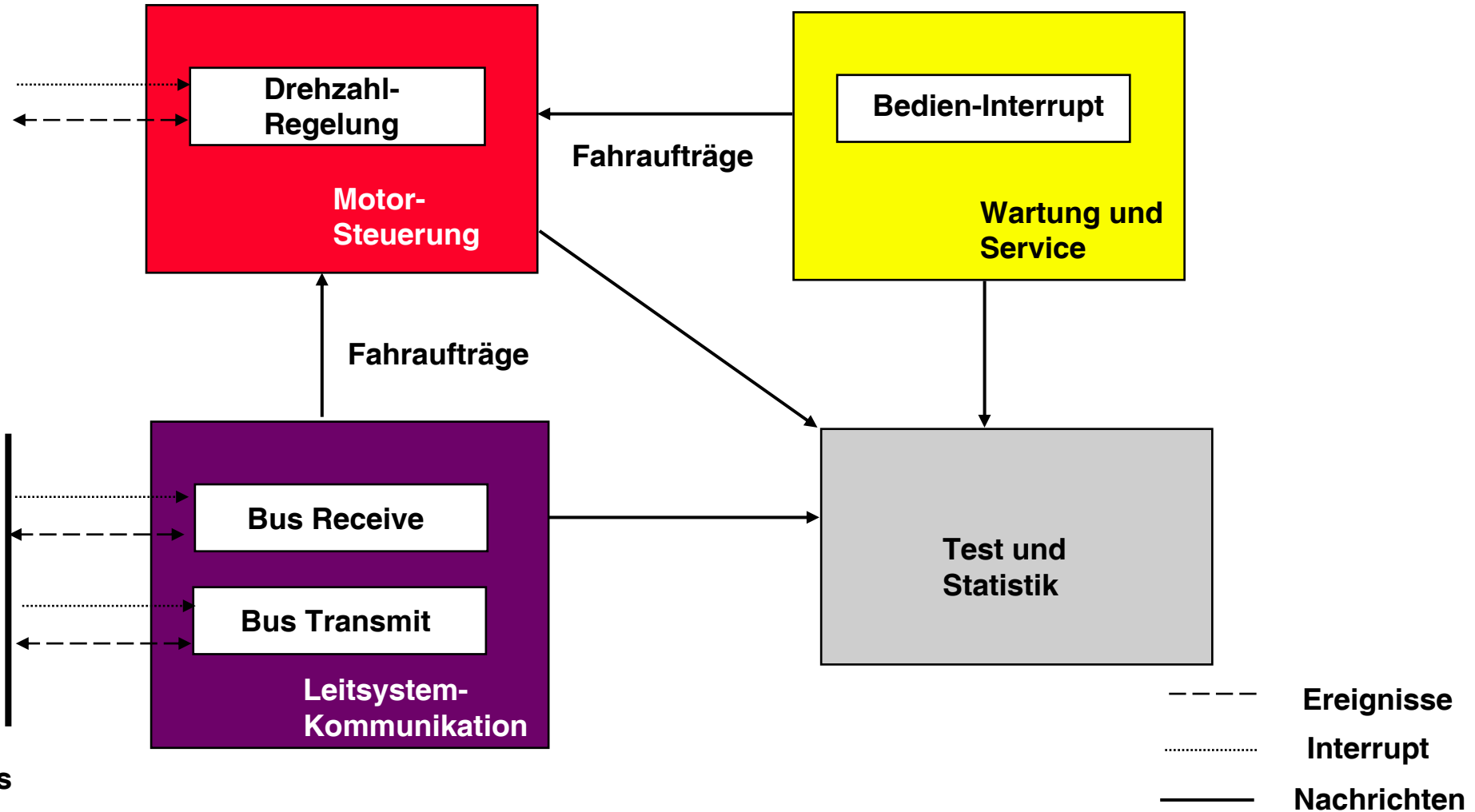
**Only StopMove ( ) is time critical (16 ms)**

**=> shortest possible duration of movement: < 30 ms = 25 + ε**

**Position Accuracy: ~10 times better than in Single Loop System**



# Architektur einer Beispiel - Anwendung



Feldbus





# Tasks und Handler

