



V1.0.20241012

Embedded Software Engineering 1

HS 2024 – Prof. Reto Bonderer

Autoren: Laurin Heitzer, Simone Stitz

<https://github.com/P4ntomime/EmbSW1>

Inhaltsverzeichnis

1	Embedded Systems – Allgemein	2	4.3	Spezifikationssprachen	4
1.1	Definition	2	4.4	Virtuelle Prototypen	4
1.2	Beispiele	2	4.5	X-in-the-loop	4
1.3	Deeply Embedded System	2	4.6	Entwicklungsplattformen	5
1.4	Betriebssysteme bei Embedded Systems	2	5	Zustandsbasierte Systeme	5
1.5	Bare Metal Embedded System	2	5.1	Asynchrone vs. synchrone FSM	5
1.6	Zuverlässigkeit	2	5.2	Finite State Machines (FSM)	5
1.7	Verfügbarkeit	2	5.3	State-Event-Diagramm (Zustandsdiagramm)	5
1.8	Abstraktionsschichten	2	5.4	Zustandstabelle	5
2	Real-Time System (Echtzeitsystem)	2	6	Statecharts (nach Marwedel)	5
2.1	Definitionen	2	6.1	Nachteile von State-Event-Diagrammen	5
2.2	Fehlverhalten eines Systems (failed system)	2	6.2	Definitionen	5
2.3	Echtzeitdefinition – Verschiedene Echtzeitsysteme	3	6.3	Hierarchie (OR-super-states)	6
2.4	Determinismus (determinacy)	3	6.4	Default-State	6
2.5	Auslastung (utilization)	3	6.5	History	6
2.6	Real-time Scheduling	3	6.6	Kombination: History- und Default-Mechanismus	6
3	Modellierung eines Embedded Systems	3	6.7	Parallelität (AND-super-state, Teilautomaten)	6
3.1	V-Modell für Software-Entwicklungszyklus	3	6.8	Timers	6
3.2	Model Driven Development (MDD)	3	6.9	Beispiel – Armbanduhr als Statechart	6
3.3	Vorgehen bei der Modellierung	3	7	Realisierung flache FSM	7
3.4	Systemgrenze definieren & Systemprozesse finden	3	7.1	Mögliche Realisierungen von flachen FSMs	7
3.5	Verteilungen festlegen	3	7.2	Realisierung mit Steuerkonstrukt (prozedural in C)	7
3.6	Systemprozesse detaillieren	4	7.3	Realisierung mit Steuerkonstrukt (objektorientiert in C++)	8
4	Hardware-Software-Codesign	4	7.4	Realisierung mit Tabelle	9
4.1	Ziele	4	7.5	Erweiterung der Realisierung mittels Tabellen	10
4.2	Anforderungen für praktische Anwendungen	4			

1 Embedded Systems – Allgemein

1.1 Definition

Ein Embedded System...

- ist ein System, das einen Computer beinhaltet, selbst aber kein Computer ist
- besteht üblicherweise aus Hardware (Mechanik, Elektronik) und Software
- ist sehr häufig ein Control System (Steuerung, Regelung)

Ein Embedded System beinhaltet typischerweise folgende Komponenten:

- Sensoren
- Mikrocomputer
- Hardware (Mechanik, Elektronik)
- Aktoren
- Software (Firmware)

1.1.1 Charakterisierung von Embedded Systems

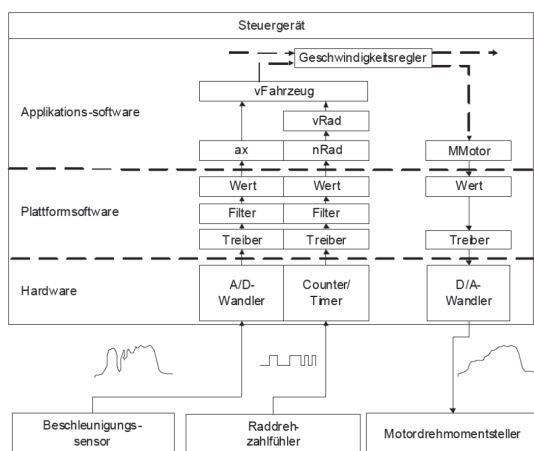
Embedded Systems können (**müssen aber nicht**) folgende Eigenschaften haben:

- **reactive systems:** Reaktive Systeme interagieren mit ihrer Umgebung
- **real-time systems:** Echtzeitsysteme haben neben funktionale Anforderungen auch definierbaren zeitlichen Anforderungen zu genügen
- **dependable systems:** Verlässliche Systeme sind Systeme, welche (sehr) hohe Zuverlässigkeitsanforderungen erfüllen müssen
- **Weitere (häufige) Anforderungen:**
 - kleiner Energieverbrauch
 - kleine physikalische Abmessungen
 - Lärm, Vibration, etc.

1.1.2 Typischer Aufbau

Ein gutes Design beinhaltet unterschiedliche Abstraktionsschichten ⇒ Layer

⇒ Siehe Abschnitt 1.8



1.2 Beispiele

Fahrrad-Computer

- GPS-Navigation
- Geschwindigkeits- und Trittfrequenzmessung
- Pulsmesser
- Drahtlosübertragung (ANT+)
- Interface zu elektronischer Gangschaltung
- Barometer, Thermometer
- Trainingsassistent
- Display

Auto

- Sicherheitsrelevante Aufgaben
 - ABS, ASR
 - Motorenregelung
 - Drive-by-wire
 - Autonom fahrende Autos
 - Unterhaltung / Komfort
 - Radio / CD / etc.
 - Navigation
 - Klima
 - Mehrere Netzwerke
 - CAN, LIN, Ethernet
 - Echtzeiteile und andere
 - Von einfachsten μ Cs bis DSPs und GPUs
- ⇒ Auto ist ein riesiges Embedded System

Weitere Beispiele

- Smartphone
- Mobile Base Station
- CNC-Bearbeitungszentrum
- Hörgerät

1.3 Deeply Embedded System

- 'Einfaches' Embedded System, mit **minimaler Benutzerschnittstelle**, üblicherweise mit **keinerlei GUI** und **ohne Betriebssystem**
- Beschränkt auf **eine** Aufgabe (z.B. Regelung eines physikalischen Prozesses)
- Muss oft zeitliche Bedingungen erfüllen ⇒ Echtzeitsystem

1.3.1 Beispiele – Deeply Embedded System

- Hörgerät
- ABS-Controller
- etc...
- Motorenregelung
- 'Sensor' im IoT

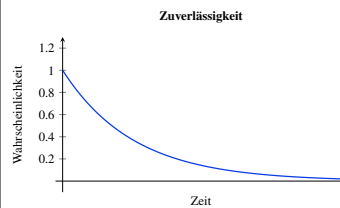
1.4 Betriebssysteme bei Embedded Systems

- Es kommen Betriebssysteme wie (Embedded) Linux oder Android zum Einsatz
⇒ **Achtung: Linux und Android sind nicht echtzeitfähig!**
- Wenn Echtzeit verlangt wird: real-time operating systems (RTOS)
 - Beispiele: Zephyr, Free RTOS (Amazon), TI-RTOS (Texas Instruments), etc.

1.5 Bare Metal Embedded System

- Es kommt **keinerlei Betriebssystem** zum Einsatz
- Bare Metal Embedded Systems sind recht **häufig**, insbesondere bei **Deeply Embedded Systems**
- Bare Metal Embedded Systems stellen besondere Ansprüche an Programmierung

1.6 Zuverlässigkeit



- Je länger das System läuft, desto weniger zuverlässig ist es
- Die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall steigt stetig

Achtung: Hier ist nur die Alterung der Hardware berücksichtigt

1.7 Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit A (Availability) ist der Anteil der Betriebsdauer innerhalb dessen das System seine Funktion erfüllt.

$$\text{Verfügbarkeit} = \frac{\text{Gesamtzeit} - \text{Ausfallzeit}}{\text{Gesamtzeit}}$$

1.8 Abstraktionsschichten

- Bei μ C-Programmierung (Firmware) müssen oft Bitmuster in Register geschrieben werden
- Solche Register-Zugriffe dürfen **nicht** 'willkürlich' überall im Code erfolgen
⇒ schlecht lesbar, schlecht portiertbar, fehleranfällig
- **Damit Code lesbarer und besser auf andere Plattform portierbar wird, beinhaltet jeder professionelle Code einen Hardware Abstraction Layer (HAL)**
- HAL führt **nicht** zum Verlust bei Laufzeit, wenn korrekt implementiert

1.8.1 Hardware-abstraction-layer (HAL)

- Trennt HW-Implementierung von SW-Logik
- Gleiche SW kann auf verschiedene HW verwendet werden ⇒ Portabilität
- HW-Komponenten können einfach ausgetauscht werden ⇒ Flexibilität

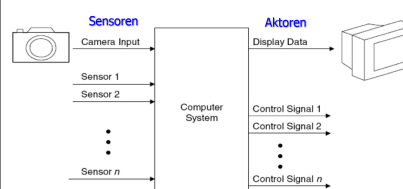
2 Real-Time System (Echtzeitsystem)

2.1 Definitionen

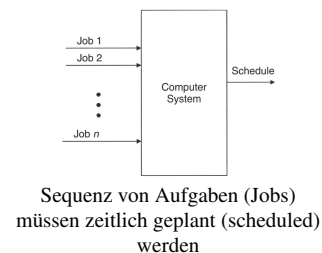
2.1.1 Real-Time System (Echtzeitsystem)

- Ein Echtzeitsystem ist ein System, das Informationen **innerhalb einer definierten Zeit (deadline)** bearbeiten muss.
⇒ Explizite Anforderungen an **turnaround-time** (Antwortzeit) müssen erfüllt sein
- Wenn diese Zeit nicht eingehalten werden kann, ist mit einer **Fehlfunktion** zu rechnen.

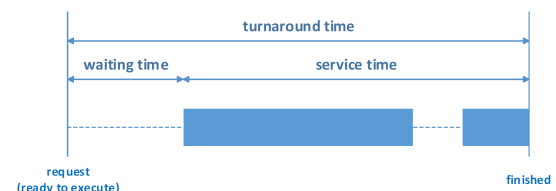
Typisches Echtzeitsystem



Repräsentation RT-System



2.1.2 Zeitdefinitionen (Task)



- **turnaround time:** (response time, Antwortzeit)
 - Startet, wenn der Task bereit zur Ausführung ist und endet, wenn der Task fertig abgearbeitet ist
 - Zeit zwischen dem Vorhandensein von Eingangswerten an das System (Stimulus) bis zum Erscheinen der gewünschten Ausgangswerte.
- **waiting time:** (Wartezeit)
 - Zeit zwischen Anlegen der Eingangswerte und Beginn der Abarbeitung des Tasks
- **service time:** (Bearbeitungszeit)
 - Zeit für Abarbeitung des Tasks ⇒ Unterbrechungen bzw. (preemptions) möglich

2.2 Fehlverhalten eines Systems (failed system)

- Ein fehlerhaftes System (failed system = missglücktes System) ist ein System, das nicht alle formal definierten Systemspezifikationen erfüllt.
- **Die Korrektheit eines RT Systems bedingt sowohl die Korrektheit der Outputs als auch die Einhaltung der zeitlichen Anforderungen.**

2.3 Echtzeitdefinition – Verschiedene Echtzeitsysteme

- **soft real-time system** (weiches Echtzeitsystem)
 - Durch Verletzung der Antwortzeiten wird das System **nicht** ernsthaft beeinflusst
 - Es kommt zu Komforteinbußen
- **hard real-time system** (hartes Echtzeitsystem)
 - Durch Verletzung der Antwortzeiten wird das System **ernsthaft beeinflusst**
 - Es kann zu einem kompletten Ausfall oder katastrophalem Fehlverhalten kommen
- **firm real-time system** (festes Echtzeitsystem)
 - Kombination aus soft real-time system und hard real-time system
 - Durch Verletzung einiger weniger Antwortzeiten wird das System nicht ernsthaft beeinflusst
 - Bei vielen Verletzungen der Antwortzeiten kann es zu einem kompletten Ausfall oder katastrophalem Fehlverhalten kommen

2.3.1 Beispiele verschiedener Echtzeitsysteme

System	Klassifizierung	Erläuterung
Geldautomat	soft	Auch wenn mehrere Deadlines nicht eingehalten werden können, entsteht dadurch keine Katastrophe. Im schlimmsten Fall erhält ein Kunde sein Geld nicht.
GPS-gesteuerter Rasenmäher	firm	Wenn die Positionsbestimmung versagt, könnte das Blumenbeet der Nachbarn platt gemäht werden.
Regelung eines Quadcopters	hard	Das Versagen der Regelung kann dazu führen, dass der Quadrocopter ausser Kontrolle gerät und abstürzt.

2.4 Determinismus (determinacy)

Ein System ist deterministisch, wenn für jeden möglichen Zustand und für alle möglichen Eingabewerte **jederzeit der nächste Zustand und die Ausgabewerte definiert** sind.

Insbesondere race conditions können dazu führen, dass der nächste Zustand davon abhängt, 'wer das Rennen gewonnen hat und wie gross die Bestzeit ist', d.h. der nächste Zustand ist nicht klar bestimmt.

⇒ Nicht mehr deterministisch und nicht mehr echtzeitauglich

2.5 Auslastung (utilization)

Die (CPU-) Auslastung (utilization) ist der Prozentsatz der Zeit, zu der die XPU **nützliche (non-idle) Aufgaben** ausführt.

2.5.1 Berechnungen zur Auslastung (utilization)

Annahmen:

- System mit $n \geq 1$ periodischen Tasks T_i und Periode p_i
- Jeder Task T_i hat bekannte / geschätzte maximale (worst case) execution time e_i

Auslastungsfaktor eines Tasks

$$u_i = \frac{e_i}{p_i}$$

⇒ utilization factor

Gesamtauslastung des Systems

$$U = \sum_{i=1}^n u_i = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{p_i}$$

⇒ utilization

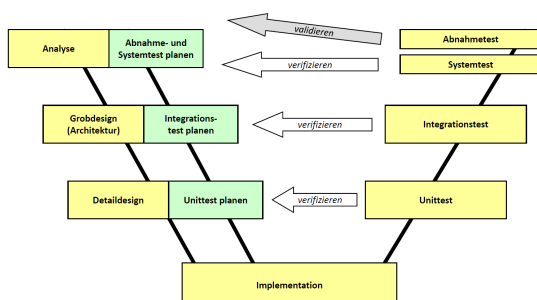
⇒ Bei 69 % Auslastung ist das 'theoretical limit'

2.6 Real-time Scheduling

- Alle kritischen Zeiteinschränkungen (deadlines, response time) sollen eingehalten werden
- Im Notfall muss der Scheduling Algorithmus entscheiden, um die kritischsten Tasks einhalten zu können.
 - Unter Umständen müssen dabei Deadlines von weniger kritischen Tasks verletzt werden.

3 Modellierung eines Embedded Systems

3.1 V-Modell für Software-Entwicklungszyklus



⇒ Nur Anforderungen (requirements) definieren, welche man auch testen kann!

3.2 Model Driven Development (MDD)

- Bei **modellbasierter Entwicklung** kommen in **allen Entwicklungsphasen** durchgängig Modelle zur Anwendung

- MDD geht davon aus, dass aus formalen Modellen lauffähige Software erzeugt wird ⇒ Codegeneratoren
 - Modelle werden traditionell als Werkzeug der Dokumentation angesehen
 - Unter Umständen wird zweimal dasselbe beschrieben (Code und Diagramm)
- ⇒ **unbedingt zu vermeiden!**

3.3 Vorgehen bei der Modellierung

1. **Systemgrenze definieren**
 - Kontextdiagramm: Use-Case-Diagramm
 - Kontextdiagramm: Sequenzdiagramm
2. **Systemprozess finden**
 - Kontextdiagramm: Use-Case-Diagramm
 - Kontextdiagramm: Sequenzdiagramm
3. **Verteilungen festlegen**
 - Verteilungsdiagramm (deployment diagram)
4. **Systemprozesse detaillieren**
 - Umgangssprachlicher Text
 - Sequenzdiagramm
 - Aktivitätsdiagramm
 - Statecharts
 - Code (C, C++, ...)

Strukturmodellierung (Statische Aspekte)

Modellierung der dynamischen Aspekte

3.4 Systemgrenze definieren & Systemprozesse finden

3.4.1 Systemgrenze definieren

Die Festlegung der Systemgrenze ist das Wichtigste und Allererste bei sämtlichen Systemen!

Man sollte sich die folgenden Fragen stellen und diese beantworten:

- Was macht das System, d.h. was liegt innerhalb der Systemgrenze?
 - Was macht das System **nicht**?
- Mit welchen Teilen ausserhalb des Systems kommuniziert das System?
- Welches sind die Schnittstellen zu den Nachbarsystemen (Umsystemen, peripheren Systemen)?

3.4.2 Systemprozesse finden (use-cases)

Da man sich noch immer in der **Analyse** befindet, sollen nur die **Anforderungen** definiert werden. Die Umsetzung ist Teil des Designs!

Um die Use-Cases zu identifizieren, sollte folgendes beachtet werden:

- Aussenbetrachtung des Systems (**oberflächlich!**)
 - Nicht komplizierter als nötig
- System als Blackbox betrachten
 - **Was** soll System können; (nicht: wie soll das System etwas machen)
- RTE-Systeme bestehen häufig aus nur einem einzigen Systemprozess
 - speziell wenn System 'nur' ein Regler ist

3.4.3 Kontextdiagramm: Use-Case Diagramm

Tempomat: zu detailliert



Tempomat: verbesserte Version



3.4.4 Kontextdiagramm: Sequenzdiagramm

- Speziell bei Systemen, deren Grenzen durch **Nachrichtenflüsse** charakterisiert werden können
- Details zu Sequenzdiagrammen siehe Abschnitt 3.6.1

3.5 Verteilungen festlegen

- Bei Embedded Systems werden häufig **mehrere Rechnersysteme** verwendet, um die verschiedenen Aufgaben zu erledigen
- Rechner sind örtlich verteilt und mittels Kommunikationskanal verbunden
 - ⇒ **Verteilte Systeme (distributed systems)**

3.5.1 Verteilungsdiagramm

Knoten: Darstellung der örtlichen Verteilung der Systeme
Knoten können auch hierarchisch aufgebaut sein

Linien: Physikalische Verbindungen der Knoten (Netzwerke, Kabel, Wireless, etc.)

Beispiel: Tempomat

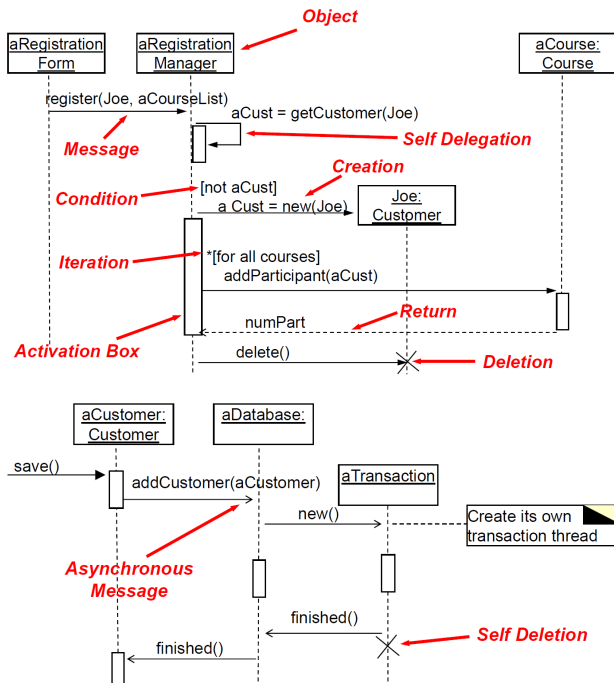


3.6 Systemprozesse detaillieren

- Die gefundenen Systemprozesse (use-cases) müssen genauer spezifiziert werden
 - Nicht detaillierter spezifizieren als sinnvoll / gefordert!**
 - Jede weitere Spezifizierung soll einen 'added value' liefern
- Verschiedene Detaillierungsstufen für verschiedene Zielgruppen
 - Auftraggeber: Überblick (z.B. in Form von Umgangssprachlichem Text)
 - Systementwickler: 'Normale Sicht' enthält mehr Details

3.6.1 Sequenzdiagramm

- Gute Darstellung für **Austausch von Meldungen** zwischen Objekten innerhalb einer **beschränkten Zeitdauer**
 - Nachrichtenflüsse
 - Kommunikationsprotokolle
- Ideal für...
 - kurze Zeitdauer
 - wenige Objekte
 - wenige Verschachtelungen
 - wenige Verzweigungen

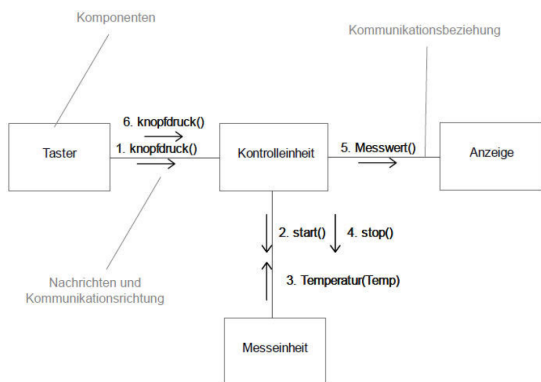


Pfeiltyp	Semantik
	Synchrone Aufrufe
	Asynchrone Nachrichten
	Datenfluss

- Beim Zeichnen von Hand unbedingt die **Pfeilkonventionen** beachten!
- Diagramme generell nicht 'überladen'

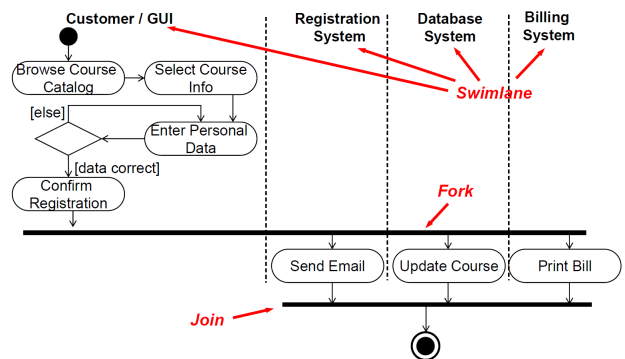
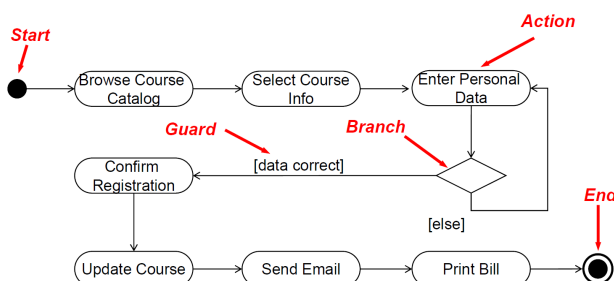
3.6.2 Kommunikationsdiagramm (Kollaborationsdiagramm)

- Kommunikationsdiagramm zeigt **dieselbe Information** wie Sequenzdiagramm
- Schwerpunkt: Informationsfluss** zwischen den Objekten
 - Beim Sequenzdiagramm liegt der Schwerpunkt auf dem zeitlichen Ablauf



3.6.3 Aktivitätsdiagramm

- Gut geeignet für ...
 - workflow modelling**
 - Sequenzielle Abläufe
 - Prozess- und Steuerfluss
 - Gleichzeitige Prozesse (fork, join)
- Weniger geeignet für ...
 - komplexe logische Bedingungen



4 Hardware-Software-Codesign

4.1 Ziele

- Entwurf (Design) **so lange wie sinnvoll** (nicht so lange wie möglich) **lösungsneutral**
- Systemdesign fördern**, statt separate Designs für Mechanik, Elektronik, Firmware, Software, etc., die sich unter Umständen auch widersprechen können
- Systemspezifikation erfolgt idealerweise mit Hilfe einer **eindeutigen Spezifikationssprache**, nicht in Prosa
- Die Spezifikation sollte simuliert (ausgeführt) werden können
- Implementationen können einfach geändert werden: HW ↔ SW
- Zielplattformen: diskrete Elektronik, ASIC, μ C, DSP, **FPGA**, Software

4.2 Anforderungen für praktische Anwendungen

- Methoden / Tools sollten beim Systemdesign nicht zu fachlastig sein
 - Methoden sollten für Elektronik-, Firmware- und wenn möglich auch Mechanik-entwickler anwendbar sein
- Wenn möglich gute Toolunterstützung
- (Automatische Synthese aus dem Modell)

4.3 Spezifikationssprachen

- Formale Sprachen sind eindeutig** (Prosa immer mehrdeutig)
- Spezifikation kann kompiliert und ausgeführt werden ⇒ Simulationen
- Die ausführbare Spezifikation dient als **Golden Reference** für die künftigen Entwicklungsschritte

Beispiele für Spezifikationssprachen

- SystemC (eine C++-Template Library)
- SysML
- SpecC
- SystemVerilog
- Esterel
- Matlab/Simulink
- Statecharts

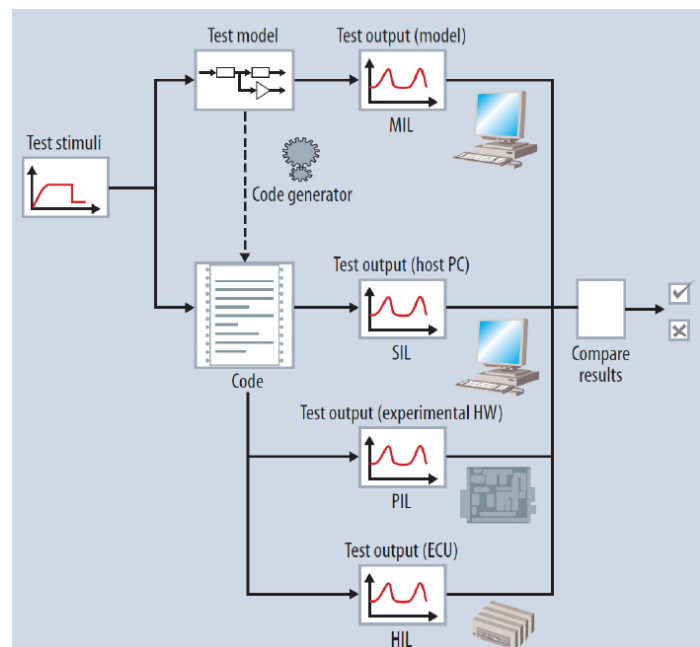
4.4 Virtuelle Prototypen

- Die Simulation des Systems kann unterschiedlich stark detailliert werden
- Die simulierten Systeme sind Virtuelle Prototypen**
- Während der Entwicklung können einzelne (virtuelle) Teile des Prototyps laufend durch physische Teile ersetzt werden

4.5 X-in-the-loop

- Model-in-the-Loop (MIL):** vollständig als Modell vorliegender virtueller Prototyp
- Je mehr der Prototyp durch konkretere Implementationen ersetzt wird, spricht man von
 - Software-in-the loop (SIL)
 - Processor-in-the loop (PIL)
 - Hardwarein-the loop (HIL)

⇒ Test outputs werden jeweils mit **Golden Reference** verglichen



4.6 Entwicklungsplattformen

Als Entwicklungsplattformen eignen sich häufig **FPGA basierte Systeme**.

- Hardware mit VHDL
- Software/Firmware in C/C++
 - auf integriertem μC (z.B. Zynq von AMD/Xilinx) (Hard core)
 - auf Soft Core innerhalb FPGA (z.B. Nios II von Intel/Altera)

5 Zustandsbasierte Systeme

5.1 Asynchrone vs. synchrone FSM

- **Asynchron**
 - geänderte Inputsignale führen **direkt** zur Zustandsänderung
 - schneller, aber enorm anfällig auf Glitches
- **Synchron**
 - Inputsignale werden nur zu diskreten Zeitpunkten betrachtet \Rightarrow getaktete Systeme
- Softwareimplementationen sind eigentlich immer **synchron**, da Rechner getaktet sind
- Rein softwareseitig besteht die Problematik der Asynchronizität nicht

5.2 Finite State Machines (FSM)



Eine FSM besitzt die folgenden Eigenschaften:

- Eine FSM befindet sich immer in einem **definierten Zustand**
- Die **Inputs** X bezeichnen üblicherweise **Ereignisse (Events)**
- Die **Outputs** Y werden oft auch **Actions** genannt
- Eine FSM benötigt immer **Speicherelemente** zur Speicherung des internen Zustands
 - Eine FSM ist ein sequenzielles und kein kombinatorisches System

Eine FSM kann auf zwei Arten dargestellt werden:

- State-Event-Diagramm
- Zustandstabelle

5.2.1 Mealy-Automat

- Nächster Zustand Z_{n+1} abhängig vom Input X und vom internen Zustand Z_n
 - $Z_{n+1} = f(Z_n, X)$
- Output Y ist abhängig vom internen Zustand Z_n **und vom Input** X
 - $Y = g(Z_n, X)$
- Actions liegen bei den Transitionen

5.2.2 Moore-Automat

- Nächster Zustand Z_{n+1} abhängig vom Input X und vom internen Zustand Z_n
 - $Z_{n+1} = f(Z_n, X)$
- Output Y ist **nur** abhängig vom internen Zustand Z_n
 - $Y = g(Z_n)$
- Actions liegen bei den Zuständen

\Rightarrow Wenn immer möglich sollten Moore-Automaten verwendet werden

5.2.3 Medvedev-Automat

- Nächster Zustand Z_{n+1} abhängig vom Input X und vom internen Zustand Z_n
 - $Z_{n+1} = f(Z_n, X)$
- Output Y entspricht **entspricht direkt** internem Zustand Z_n
 - $Y = Z_n$
- Actions liegen bei den Zuständen

\Rightarrow Wird hier nicht weiter behandelt...

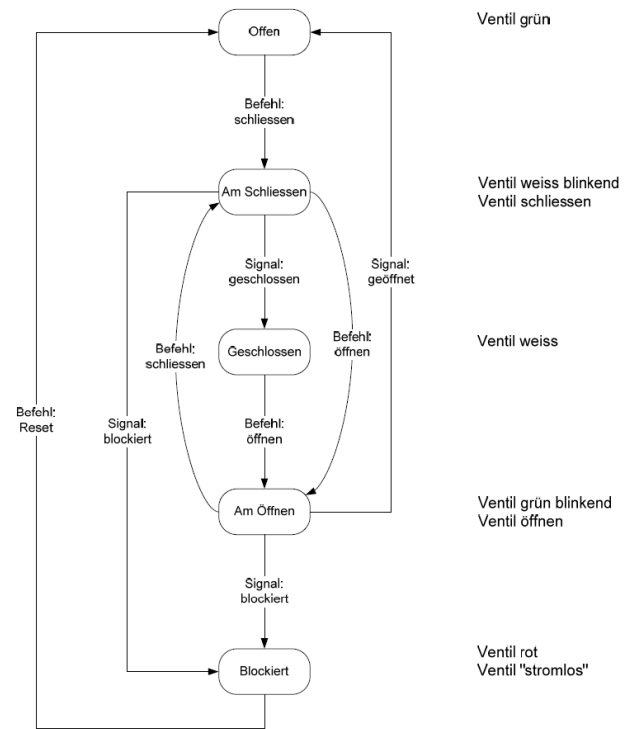
5.3 State-Event-Diagramm (Zustandsdiagramm)

Ein State-Event-Diagramm ist eine grafische Möglichkeit, um eine FSM zu beschreiben.

In einem State-Event-Diagramm gelten folgende Darstellungsformen

- **Zustände** werden mit einem **Kreis** gezeichnet
- **Ereignisse** werden mit **Pfeilen** zwischen Zuständen dargestellt (**Transitionen**)
- **Aktionen** werden entweder bei Zuständen oder bei Transitionen geschrieben (je nach Automatentyp)
- Ausführung einer Transition ist unendlich schneller
 - \Rightarrow Bei Modellierung sind Zwischenzustände vorgehen, z.B. 'closing', starting up'

Beispiel: State-Event-Diagramm – Moore Automat



5.4 Zustandstabelle

Nebst der grafischen Darstellung einer FSM mittels State-Event-Diagramm kann die FSM auch tabellarisch mittels Zustandstabelle beschrieben werden.

Beispiel: Zustandstabelle für Elektromotor

Momentaner Zustand	Ereignis	Nächster Zustand	Aktionen
AUS	EIN-Taste	Hochlaufen	Motor ausschalten Kühlung ausschalten Grüne Lampe aus Rote Lampe aus
Hochlaufen	Drehzahl_erreicht	Drehzahl_ok	Motor einschalten Kühlung einschalten
	Signal		
	Aus-Taste	AUS	
Drehzahl_ok	Wasserkühlung	Störung	Grüne Lampe anzeigen
	Störung		
	AUS-Taste	AUS	
Störung	RESET-Taste	AUS	Motor ausschalten Kühlung ausschalten Rote Lampe anzeigen

6 Statecharts (nach Marwedel)

6.1 Nachteile von State-Event-Diagrammen

- Zustandsdiagramme sind flach (es gibt keine Hierarchie) \Rightarrow schnell unübersichtlich
- Es kann keine zeitliche Parallelität modelliert werden

6.2 Definitionen

active state: Aktueller Zustand der FSM

basic states: Zustände, die **nicht** aus anderen Zuständen bestehen

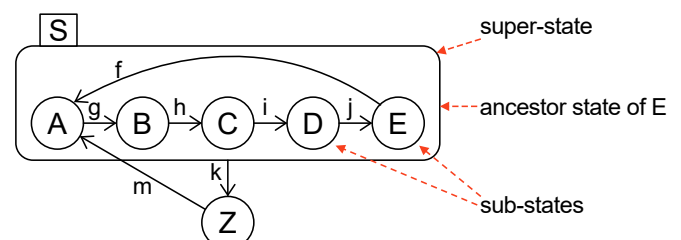
super states: Zustände, die andere Zustände enthalten

ancestor states: Für jeden basic state s werden die super states, die s enthalten, als **ancestor states** bezeichnet

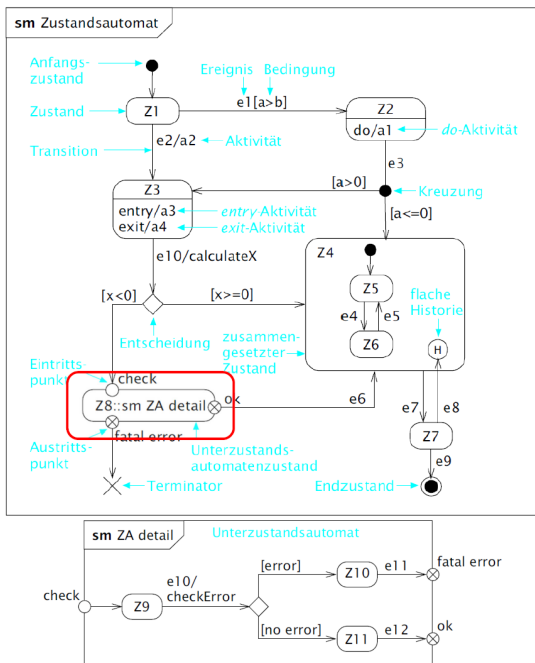
OR-super-states: Super-states S werden OR-super-states genannt, wenn **genau einer** der sub-states von S aktiv ist, wenn S aktiv ist \Rightarrow Hierarchie

AND-super-states: Super-states S werden AND-super-states genannt, wenn **mehrere** der sub-states von S **gleichzeitig** aktiv sind, wenn S aktiv ist \Rightarrow Parallelität

\Rightarrow Werden auch **Teilautomaten** genannt



6.2.1 Elemente der Statecharts



6.2.2 Allgemeine Syntax für Transitions-Pfeile

event [guard] / reaction

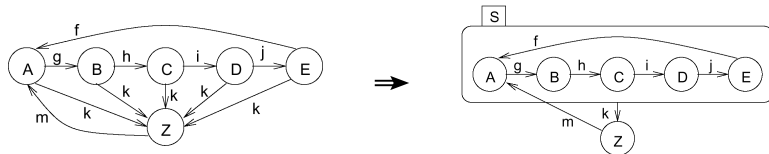
event auftretendes Event

guard Bedingung, welche zutreffen muss, damit Zustand überhaupt gewechselt wird

reaction Zuweisung einer Variablen / Erzeugung eines Events beim Zustandswechsel

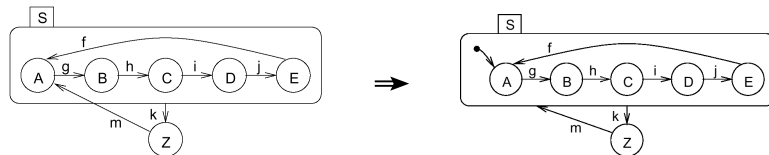
6.3 Hierarchie (OR-super-states)

- Die FSM befindet sich in **genau einem** sub-state von S , wenn S aktiv ist.
(\Rightarrow either in A OR in B OR ...)



6.4 Default-State

- Ziel: Interne Struktur des states vor der Aussenwelt verstecken \Rightarrow default state
- Ausgefüllter Kreis beschreibt den sub-state, welcher 'betreten' wird, wenn der super-state S 'betreten' wird



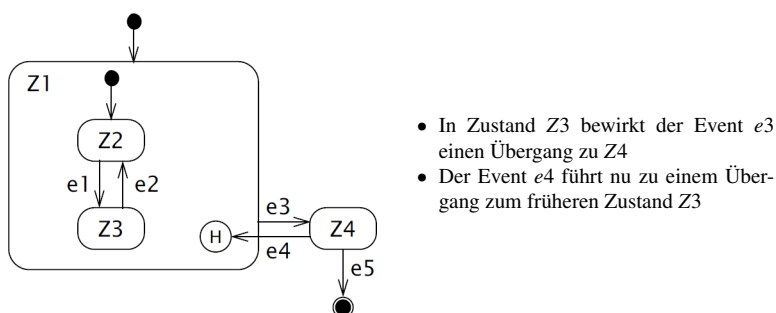
6.5 History

- Wenn Input m auftritt, wird in S derjenige sub-state betreten, in welchem man war, bevor S verlassen wurde
 - Wenn S zum ersten Mal betreten wird, ist der **default-Mechanismus** aktiv
- History und Default-Mechanismus können hierarchisch verwendet werden

6.5.1 Shallow History

- Der History-Mechanismus merkt sich den entsprechenden sub-state
- Kennzeichnung: H^*

Beispiel: Shallow-History

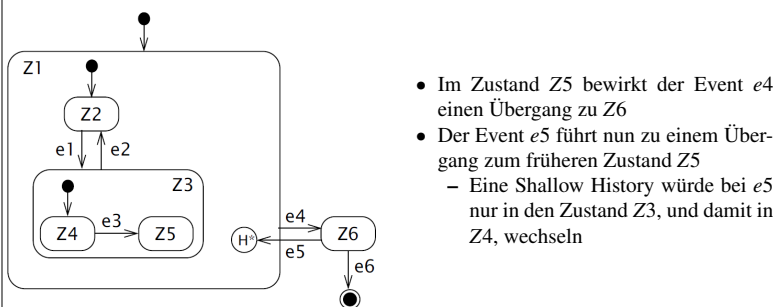


- In Zustand Z3 bewirkt der Event $e3$ einen Übergang zu Z4
- Der Event $e4$ führt nun zu einem Übergang zum früheren Zustand Z3

6.5.2 Deep History

- Der History-Mechanismus merkt sich frühere Zustände **bis in die unterste Hierarchie**
- Kennzeichnung: H^*

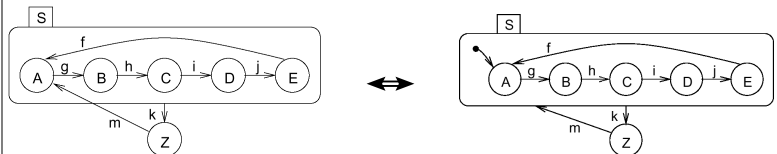
Beispiel: Deep-History



- Im Zustand Z5 bewirkt der Event $e4$ einen Übergang zu Z6
- Der Event $e5$ führt nun zu einem Übergang zum früheren Zustand Z5
 - Eine Shallow History würde bei $e5$ nur in den Zustand Z3, und damit in Z4, wechseln

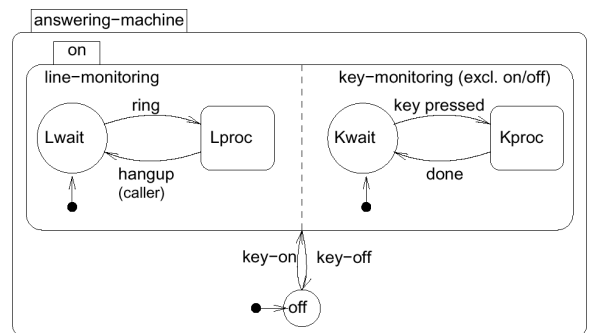
6.6 Kombination: History- und Default-Mechanismus

Folgende statecharts bilden genau das Gleiche ab



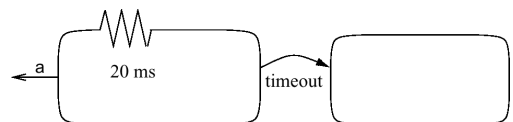
6.7 Parallelität (AND-super-state, Teilautomaten)

- Die FSM befindet sich in **allen** sub-states von einem super-state S , wenn S aktiv ist.
(\Rightarrow in A AND in B AND ...)

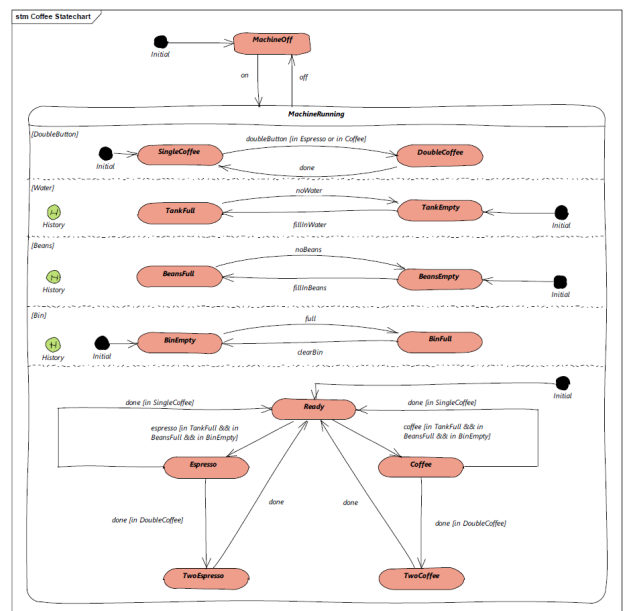


6.8 Timers

- Wenn Event a nicht eintritt, während das System für 20 ms im linken state ist, wird ein timeout passieren
- Eigentlich sind Timers nicht nötig, da die Wartezeit auch als Übergangsbedingung (Event) zwischen zwei states formuliert werden könnte



6.9 Beispiel – Armbanduhr als Statechart



7 Realisierung flache FSM

7.1 Mögliche Realisierungen von flachen FSMs

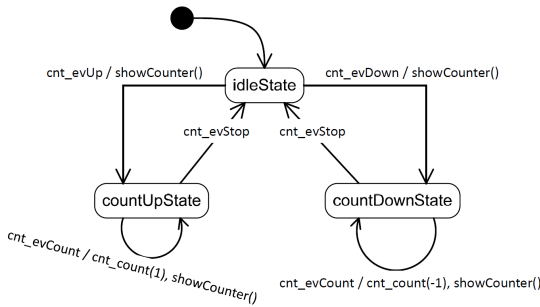
- Steuerkonstrukt (typischerweise mit **switch-case**)
 - prozedural oder objektorientiert
- Definition und Abarbeitung einer **Tabelle**
 - prozedural oder objektorientiert
- **State Pattern** (Gang of Four, GoF)
 - nur objektorientiert
- Generisch mit Templates
 - nur mit einer Sprache, die Templates unterstützt (z.B. C++)

⇒ Alle Varianten haben wie immer sowohl Vor- als auch Nachteile

⇒ Bei allen Varianten sind auch Variationen vorhanden

7.2 Realisierung mit Steuerkonstrukt (prozedural in C)

7.2.1 State-Event-Diagram – Up/Down-Counter



7.2.2 Implementation der Prozeduralen Realisierung in C

- **Ereignisse (events)**
 - Schnittstelle nach aussen ⇒ ändern Zustand der FSM
 - In enum definiert (**public**) ⇒ header-file
 - Einzelne Events und enum Bezeichnung enthalten **Unitkürzel** (hier: `cnt_`)
- **Zustände (states)**
 - In enum definiert (**nicht public**) ⇒ sourcecode-file
- **Aktueller Zustand** wird in einer **statischen Variablen** gehalten
- Die FSM wird in **zwei Funktionen** implementiert
 - Initialisierungs-Funktion (hier: `void cnt_ctrlInit(int initValue)`)
 - Prozess-Funktion (hier: `void cnt_ctrlProcess(cnt_Event e)`)
 - ⇒ Zustände prüfen, Zustandsübergänge veranlassen
- Anstoßen einer FSM
 - Initialisierung in main-Funktion
 - Überprüfung, welches Event aufgetreten ist meist in **do-while**-Schleife

7.2.3 Eigenschaften der Prozeduralen Realisierung in C

- Da aktueller Zustand eine statische Variable ist, kann es nur **eine einzige Instanz** der FSM geben
- Bei mehreren Instanzen in C...
 - darf `currentState` nicht **static** sein und muss als Parameter mitgegeben werden, bzw. ein Pointer auf die jeweilige Variable
 - Zustands-enum muss in die Schnittstelle (header-file) oder es muss z.B. mit **void*** gearbeitet werden
- In C ist **keine schöne Kapselung** der Attribute möglich (`currentState`)
- Funktion `cnt_ctrlProcess()` kann beliebig aufgerufen werden (periodischer Task, laufend, etc.)
- Bei exponierten Funktionen / Definitionen muss in C ein Unitkürzel vorangestellt werden (hier: `cnt_`)

Beispiel: Up/Down-Counter (prozedural in C)

```
1 // counter.h
2 // implements an up/down-Counter
3
4 #ifndef COUNTER_H__
5 #define COUNTER_H__
6
7 void cnt_init(int val);
8 // initializes counter to val
9
10 void cnt_count(int step);
11 // counts the counter up (step>0)
12 // or down (step<0) by step
13
14 int cnt_getCounter();
15 // returns the counter value
16
17 void cnt_setCounter(int val);
18 // sets the counter to val
19
20 #endif
```

```
1 // counter.c
2 // implements an up/down-Counter
3
4 #include "counter.h"
5
6 static int countValue;
7
8 void cnt_init(int val)
9 {
10     countValue = val;
11 }
12
13 void cnt_count(int step)
14 {
15     countValue += step;
16 }
17
18 int cnt_getCounter()
19 {
20     return countValue;
21 }
22
23 void cnt_setCounter(int val)
24 {
25     countValue = val;
26 }
```

```
1 // counterCtrl.h
2 // implements the Finite State Machine (FSM) of an up/down-Counter
3
4 #ifndef COUNTERCTRL_H__
5 #define COUNTERCTRL_H__
6
7 typedef enum {cnt_evUp,          // count upwards
8               cnt_evDown,        // count downwards
9               cnt_evCount,        // count (up or down)
10               cnt_evStop}        // stop counting
11               cnt_Event;
12
13 void cnt_ctrlInit(int initValue);
14 // initializes counter FSM
15
16 void cnt_ctrlProcess(cnt_Event e);
17 // changes the state of the FSM based on the event 'e'
18 // starts the actions
19
20 #endif
```

```
1 // counterCtrl.c
2 // implements the Finite State Machine (FSM) of an up/down-Counter
3
4 #include <stdio.h>
5 #include "counterCtrl.h"
6 #include "counter.h"
7
8 typedef enum {idleState,         // idle state
9               countUpState,      // counting up at each count event
10               countDownState}    // counting down at each count event
11               State;
12
13 static State currentState = idleState; // holds the current state of the FSM
14
15 void cnt_ctrlInit(int initValue)
16 {
17     currentState = idleState; // set init-state
18     cnt_init(initValue);      // set initValue
19 }
20
21 void cnt_ctrlProcess(cnt_Event e)
22 {
23     switch (currentState)
24     {
25     case idleState:
26         printf("State: idleState\n");
27         if (cnt_evUp == e)
28         {
29             // actions (and exit-actions from idleState)
30             printf("State: idleState, counter = %d\n", cnt_getCounter());
31             // state transition (and entry-actions from countUpState)
32             printf("Changing to State: countUpState\n");
33             currentState = countUpState;
34         }
35         else if (cnt_evDown == e)
36         {
37             // actions (and exit-actions from idleState)
38             printf("State: idleState, counter = %d\n", cnt_getCounter());
39             // state transition (and entry-actions from countDownState)
40             printf("Changing to State: countDownState\n");
41             currentState = countDownState;
42         }
43         break;
44
45     case countUpState:
46         printf("State: countUpState\n");
47         if (cnt_evCount == e)
48         {
49             // actions
50             cnt_count(1);
51             printf("State: countUpState, counter = %d\n", cnt_getCounter());
52             // state transition
53         }
54         else if (cnt_evStop == e)
55         {
56             // actions
57             // state transition
58             printf("Changing to State: idleState\n");
59             currentState = idleState;
60         }
61         break;
62
63     case countDownState:
64         // ...
65         break;
66
67     default:
68         break;
69     }
70 }
```

```
1 // counterTest.c
2 // Test program for the Finite State Machine (FSM) of an up/down-Counter
3
4 #include <stdio.h>
5 #include "counterCtrl.h"
6
7 int main(void)
8 {
9     char answer;
10    cnt_ctrlInit(0);
11
12    do
13    {
14        printf("\n-----\n");
15        printf(" u  Count up\n");
16        printf(" d  Count down\n");
17        printf(" c  Count\n");
18        printf(" s  Stop counting\n");
19        printf(" q  Quit\n");
20
21        printf("\nPlease press key: ");
```

```

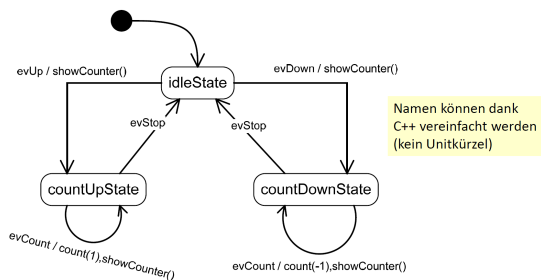
22 scanf("%c", &answer);
23 getchar(); // nach scanf() ist noch ein '\n' im Inputbuffer: auslesen und wegwerfen
24 printf("\n");
25
26 switch (answer)
27 {
28     case 'u':
29         cnt_ctrlProcess(cnt_evUp);
30         break;
31     case 'd':
32         cnt_ctrlProcess(cnt_evDown);
33         break;
34     case 'c':
35         cnt_ctrlProcess(cnt_evCount);
36         break;
37     case 's':
38         cnt_ctrlProcess(cnt_evStop);
39         break;
40     default:
41         break;
42 }
43 } while (answer != 'q');
44
45 return 0;
46 }

```

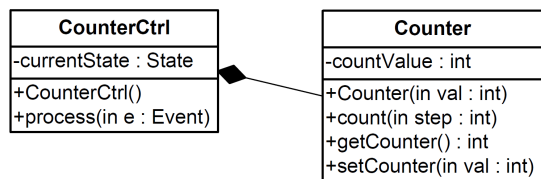
7.3 Realisierung mit Steuerkonstrukt (objektorientiert in C++)

Anstossen der FSM in C:

7.3.1 State-Event-Diagramm – Up/Down-Counter



7.3.2 Zusammenhang der Klassen Counter und CounterCtrl



- Klasse Counter führt eigentliche Rechenaufgaben durch
 - ist bei **allen** (objektorientierten) Realisierungsarten **identisch**
 - Klasse CounterCtrl ist FSM, welche Zugriff auf den Counter steuert
- ⇒ Generell sollten Steuerung und Element, das gesteuert wird, getrennt werden!

7.3.3 Implementation der Prozeduralen Realisierung in C++

- Ereignisse (events)
 - Schnittstelle nach aussen ⇒ ändern Zustand der FSM
 - Im **public** Teil der Klasse als enum definiert
 - Keine Unitkürzel nötig
- Zustände (states)
 - Im **private** Teil der Klasse als enum definiert ⇒ header-file
- Aktueller Zustand currentState wird in **privatem Attribut** von CounterCtrl gehalten
- Die FSM wird in **zwei Funktionen** implementiert
 - Konstruktor (hier: CounterCtrl::CounterCtrl(int initialValue=0))
 - Prozess-Funktion (hier: void CounterCtrl::process(CounterCtrl::Event e))
 - ⇒ Zustände prüfen, Zustandsübergänge veranlassen
- Anstossen einer FSM
 - Initialisierung in main-Funktion
 - Überprüfung, welches Event aufgetreten ist meist in **do-while**-Schleife

Beispiel: Up/Down-Counter (prozedural in C++)

```

1 // Counter.h
2 // implements an up/down-Counter
3
4 #ifndef COUNTER_H_
5 #define COUNTER_H_
6
7 class Counter
8 {
9 public:
10     Counter(int val = 0);
11
12     void count(int step);
13     // counts the counter up (step>0)
14     // or down (step<0) by step
15
16     int getCounter() const;
17     // returns the counter value
18
19     void setCounter(int val);
20     // sets the counter to val
21 private:
22     int countValue;
23 };
24
25 #endif

```

```

1 // Counter.cpp
2 // implements an up/down-Counter
3
4 #include "Counter.h"
5
6 Counter::Counter(int val): countValue(val)
7 {
8 }
9
10 void Counter::count(int step)
11 {
12     countValue += step;
13 }
14
15 int Counter::getCounter() const
16 {
17     return countValue;
18 }
19
20 void Counter::setCounter(int val)
21 {
22     countValue = val;
23 }

```

```

1 // CounterCtrl.h
2 // implements the Finite State Machine (FSM) of an up/down-Counter
3
4 #ifndef COUNTERCTRL_H_
5 #define COUNTERCTRL_H_
6 #include "Counter.h"
7
8 class CounterCtrl
9 {
10 public:
11     enum Event{evUp,           // count upwards
12                evDown,        // count downwards
13                evCount,        // count (up or down)
14                evStop};        // stop counting
15
16     CounterCtrl(int initialValue = 0); // C-tor
17
18     void process(Event e);
19     // changes the state of the FSM based on the event 'e'
20     // starts the actions
21
22 private:
23     enum State{idleState,      // idle state
24                countUpState,   // counting up at each count event
25                countDownState}; // counting down at each count event
26
27     State currentState;        // holds the current state of the FSM
28     Counter myCounter;         // holds the counter for calculations
29 };
30 #endif

```

```

1 // CounterCtrl.cpp
2 // implements the Finite State Machine (FSM) of an up/down-Counter
3
4 #include <iostream>
5 #include "CounterCtrl.h"
6 #include "Counter.h"
7 using namespace std;
8
9 CounterCtrl::CounterCtrl(int initialValue) :
10     currentState(idleState),
11     myCounter(initialValue)
12 {
13 }
14
15 void CounterCtrl::process(Event e)
16 {
17     switch (currentState)
18     {
19     case idleState:
20         cout << "State: idleState" << endl;
21         if (evUp == e)
22         {
23             // actions (and exit-actions from idleState)
24             cout << "State: idleState, counter = " << myCounter.getCounter() << endl;
25             // state transition (and entry-actions from countUpState)
26             cout << "Changing to State: countUpState" << endl;
27             currentState = countUpState;
28         }
29         else if (evDown == e)
30         {
31             // actions (and exit-actions from idleState)
32             cout << "State: idleState, counter = " << myCounter.getCounter() << endl;
33             // state transition (and entry-actions from countDownState)
34             cout << "Changing to State: countDownState" << endl;
35             currentState = countDownState;
36         }
37         break;
38
39     case countUpState:
40         cout << "State: countUpState" << endl;
41         if (evCount == e)
42         {
43             // actions
44             myCounter.count(1);
45             cout << "State: countUpState, counter = " << myCounter.getCounter() << endl;
46             // state transition
47         }
48         else if (evStop == e)
49         {
50             // actions
51             // state transition
52             cout << "Changing to State: idleState" << endl;
53             currentState = idleState;

```



```
54     }
55     break;
56
57     case countDownState:
58         // ...
59         break;
60
61     default:
62         break;
63 }
64 }
```

```
1 // counterTest.cpp
2 // Test program for the Finite State Machine (FSM) of an up/down-Counter
3
4 #include <iostream>
5 #include "CounterCtrl.h"
6 using namespace std;
7
8 int main(void)
9 {
10     char answer;
11     CounterCtrl myFsm(0); // initValue of counter == 0
12
13     do
14     {
15         cout << endl << "-----" << endl;
16         cout << "    u    Count up" << endl;
17         cout << "    d    Count down" << endl;
18         cout << "    c    Count" << endl;
19         cout << "    s    Stop counting" << endl;
20         cout << "    q    Quit" << endl;
21
22         cout << endl << "Please press key: ";
23         cin >> answer;
24         cout << endl;
25
26         switch (answer)
27         {
28             case 'u':
29                 myFsm.process(CounterCtrl::evUp);
30                 break;
31             case 'd':
32                 myFsm.process(CounterCtrl::evDown);
33                 break;
34             case 'c':
35                 myFsm.process(CounterCtrl::evCount);
36                 break;
37             case 's':
38                 myFsm.process(CounterCtrl::evStop);
39                 break;
40             default:
41                 break;
42         }
43     } while (answer != 'q');
44
45     return 0;
46 }
```

7.4 Realisierung mit Tabelle

Anstossen der FSM:

7.4.1 State-Event-Diagram – Up/Down-Counter

Siehe Abschnitt 7.3.1

7.4.2 FSM in Tabellenform

Das State-Event-Diagramm wird in eine Tabelle 'übersetzt'. Jede Zeile der Tabelle entspricht einer Transition (Pfeil) im State-Event-Diagramm

Current State	Event	Action	Next State
idleState	evUp	showCounter()	countUpState
idleState	evDown	showCounter()	countDownState
countUpState	evCount	count(1); showCounter();	countUpState
countUpState	evStop	-	idleState
countDownState	evCount	count(-1); showCounter();	countDownState
countDownState	evStop	-	idleState

7.4.3 Implementation der Realisierung mittels Tabelle in C++

- Die ganze FSM ist in einer Tabelle gespeichert
- Aktionen sind als **Funktion** implementiert, in der **Tabelle** steht der entsprechende **Funktionspointer**
- Abarbeitung der FSM erfolgt mittels **Execution Engine**, die in der Tabelle 'nachschaut', was zu tun ist
 - Execution Engine **ändert sich nicht**, wenn FSM geändert wird!
- Transition wird als klasseninterner **struct** deklariert
 - enthält aktuellen Zustand, Event, Funktionspointer auf Aktionsmethode und nächsten Zustand
- FSM wird als statischer, offener Array deklariert
 - Hier wird ganze FSM gespeichert
 - ein **struct** bildet konkret eine Zeile der Tabelle ab

7.4.4 Eigenschaften der Realisierung mittels Tabelle

- Die Tabelle kann prozedural oder **objektorientiert** implementiert werden
 - Objektorientierte Variante verwendet einzig die Datenkapselung (keine Vererbung, kein Polymorphismus)
 - Objektorientierte Variante ist klarer / schöner strukturiert
- Aktions-Funktionen können **nicht inlined** werden, da ein Pointer auf die Funktionen verwendet wird

7.4.5 Tabelle vs. prozedural

Gemeinsamkeiten

- Testprogramm counterTest.cpp
- Schnittstelle (public-Teil) von Klasse CounterCtrl
- Gesamte Klasse Counter

Unterschiede

- private-Teil von Klasse CounterCtrl und Implementation davon

Beispiel: Up/Down-Counter (mit Tabelle in C++)

```
1 // CounterCtrl.h
2 // implements the Finite State Machine (FSM) of an up/down-Counter as a simple table
3
4 #ifndef COUNTERCTRL_H_
5 #define COUNTERCTRL_H_
6 #include "Counter.h"
7
8 class CounterCtrl
9 {
10     /* ----- NO CHANGES ----- */
11 public:
12     enum Event{evUp,           // count upwards
13                evDown,        // count downwards
14                evCount,        // count (up or down)
15                evStop};        // stop counting
16
17     CounterCtrl(int initValue = 0); // C-tor
18
19     void process(Event e); // execution engine
20     // changes the state of the FSM based on the event 'e'
21     // starts the actions
22
23 private:
24     enum State{idleState,      // idle state
25                countUpState,   // counting up at each count event
26                countDownState}; // counting down at each count event
27
28     State currentState; // holds the current state of the FSM
29     Counter myCounter;  // holds the counter for calculation
30
31     /* ----- CHANGES ----- */
32
33     typedef void (CounterCtrl::*Action)(void); // function ptr for action function
34
35     // action functions (must match with function pointer!)
36     void actionIdleUp(void);
37     void actionIdleDown(void);
38     void actionDoNothing(void); // ensure that there is always a valid fkt-ptr
39     void actionUpUp(void);
40     void actionDownDown(void);
41
42     struct Transition
43     {
44         State currentState; // current state
45         Event ev;           // event triggering the transition
46         Action pAction;     // pointer to action function
47         State nextState;    // next state
48     };
49
50     // static open array for transition structs
51     static const Transition fsm[];
52 };
53 #endif
```

```
1 // CounterCtrl.cpp
2 // implements the Finite State Machine (FSM) of an up/down-Counter as a simple table
3
4 #include <iostream>
5 #include "CounterCtrl.h"
6 #include "Counter.h"
7 using namespace std;
8
9 const CounterCtrl::Transition CounterCtrl::fsm[] = // this table defines the fsm
10 {
11     {idleState, evUp, &CounterCtrl::actionIdleUp, countUpState},
12     {idleState, evDown, &CounterCtrl::actionIdleDown, countDownState},
13     {countUpState, evCount, &CounterCtrl::actionUpUp, countUpState},
14     {countUpState, evStop, &CounterCtrl::actionDoNothing, idleState},
15     {countDownState, evCount, &CounterCtrl::actionDownDown, countDownState},
16     {countDownState, evStop, &CounterCtrl::actionDoNothing, idleState}
17 };
18
19 CounterCtrl::CounterCtrl(int initValue) : // initializations with initialization list
20     currentState(idleState),
21     myCounter(initValue)
22 {
23 }
24
25 void CounterCtrl::process(Event e) // execution engine, this function never changes!
26 {
27     for (size_t i = 0; i < sizeof(fsm) / sizeof(Transition); ++i) // determine number of
28         // transitions automatically
29     {
30         if (fsm[i].currentState == currentState & fsm[i].ev == e) // is there an entry in the
31             // table?
32         {
33             (this->*fsm[i].pAction)();
34             currentState = fsm[i].nextState;
35             break;
36         }
37     }
38
39     // action functions
40     void CounterCtrl::actionIdleUp(void)
41     {
42         cout << "State: idleState, counter = " << myCounter.getCounter() << endl;
43     }
44     void CounterCtrl::actionIdleDown(void)
45     {
46         cout << "State: idleState, counter = " << myCounter.getCounter() << endl;
47     }
```

```

47 }
48
49 void CounterCtrl::actionDoNothing(void)
50 {
51 }
52
53 void CounterCtrl::actionUpUp(void)
54 {
55     myCounter.count(1);
56     cout << "State: countUpState, counter = " << myCounter.getCounter() << endl;
57 }
58
59 void CounterCtrl::actionDownDown(void)
60 {
61     myCounter.count(-1);
62     cout << "State: countDownState, counter = " << myCounter.getCounter() << endl;
63 }

```

7.5 Erweiterung der Realisierung mittels Tabellen

Implementation FSM in C++:

- Wenn der Zustandsübergang nicht durch einen Event, sondern eine **komplexere Prüfung (Event und Guard)** ausgelöst wird, dann könnte der **Event-Eintrag** in der Tabelle durch einen weiteren **Funktionspointer** auf eine **Checkfunktion** ersetzt werden.
- Ergänzung für die Behandlung von Entry- und Exit-Actions

Beispiel: Up/Down-Counter (mit Checker-Tabelle in C++)

- Änderungen in CounterCtrl.h ⇒ siehe Beispiel-Code
- Änderungen in CounterCtrl.cpp
 - checker-Funktionen müssen implementiert werden
 - In Tabelle steht statt Event die Adresse der checker-Funktion (analog zu action-Funktionen)

```

1 // ...
2
3 typedef bool (CounterCtrl::*Checker)(Event); // function ptr for checker function
4 typedef void (CounterCtrl::*Action)(void); // function ptr for action function
5
6 // check functions
7 bool checkIdleUp(Event e);
8 bool checkIdleDown(Event e);
9 // ...
10
11 struct Transition
12 {
13     State currentState; // current state
14     Checker pChecker; // pointer to checker function
15     Action pAction; // pointer to action function
16     State nextState; // next state
17 };
18
19 // ...

```