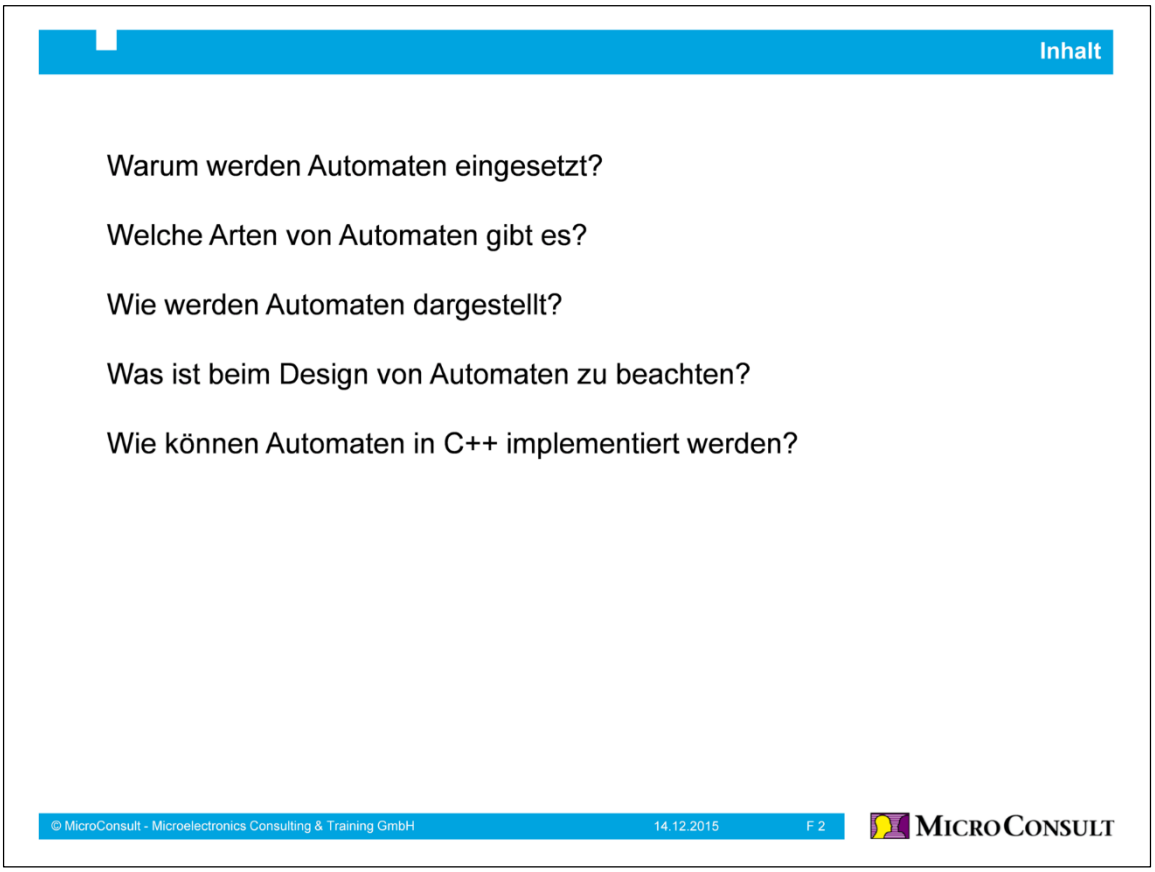
Inhalt

1 Inhalt

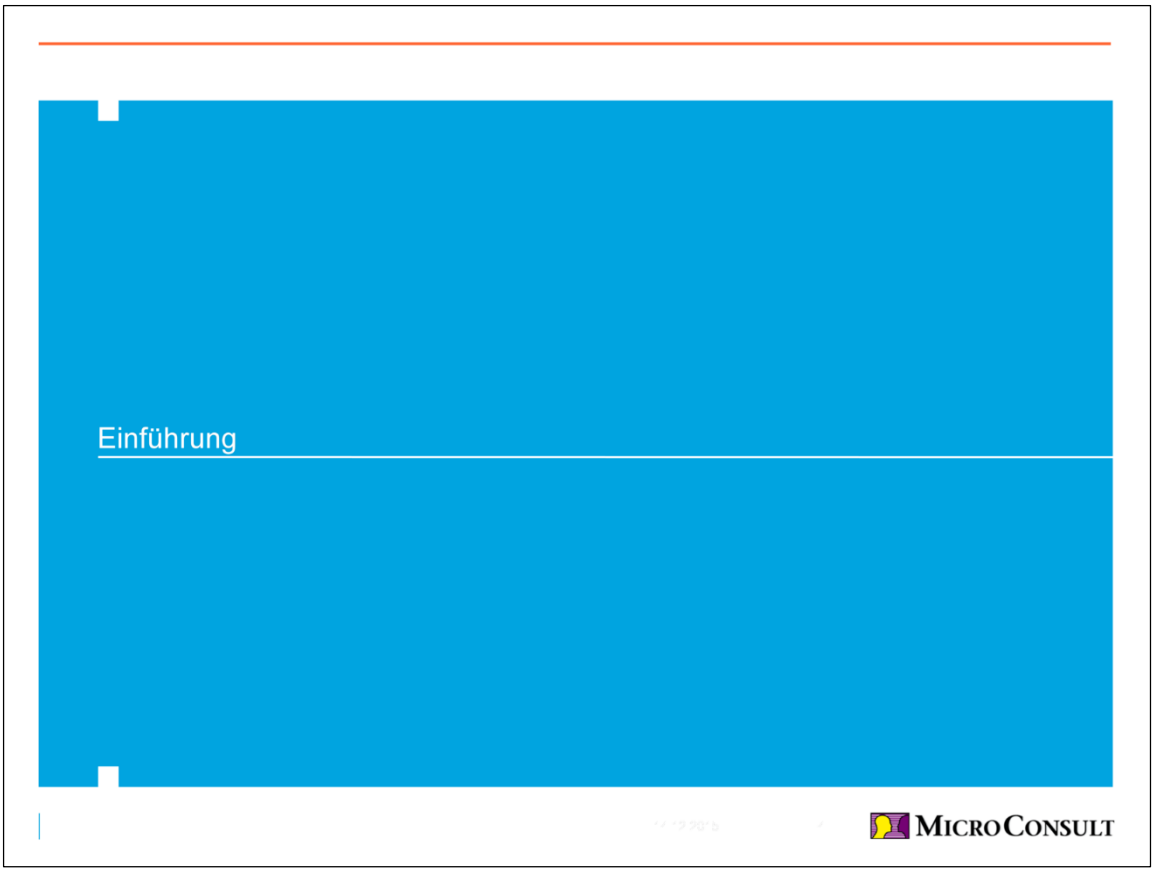


Inhalt

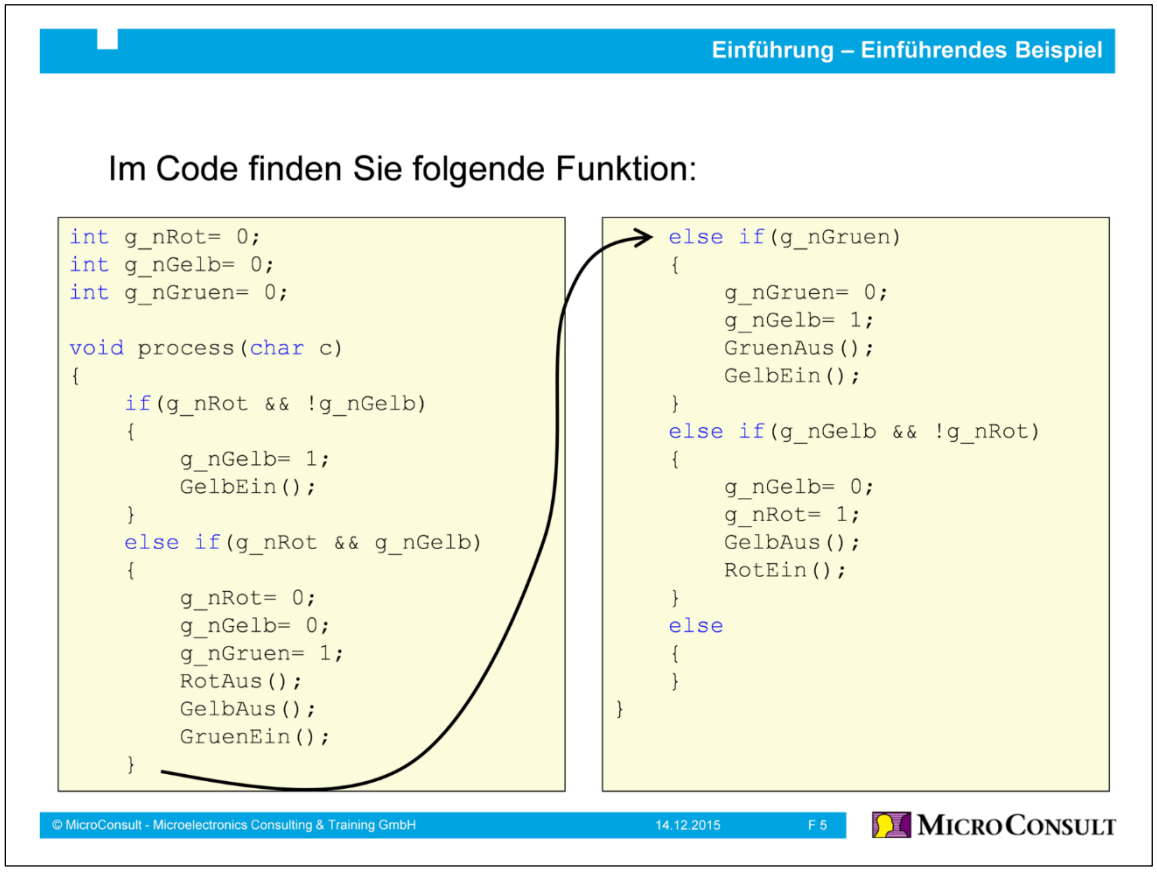
Im Embedded-Bereich werden viele Applikationen programmiert, die zustandsbehaftete Systeme steuern.

Modellierungstools mit Codegenerierung sind oft zu teuer oder im aktuellen Projekt nicht einsetzbar.

2 Einführung



2.1 Einführendes Beispiel



Einführung – Einführendes Beispiel

Was will uns dieser Code sagen?

→ Die Abfrage von vielen Statusvariablen deutet auf ein zustandsbasiertes System hin.

Es wurde versucht, eine einzelne Ampel mit ihren Phasen abzubilden.

Einführung – Einführendes Beispiel

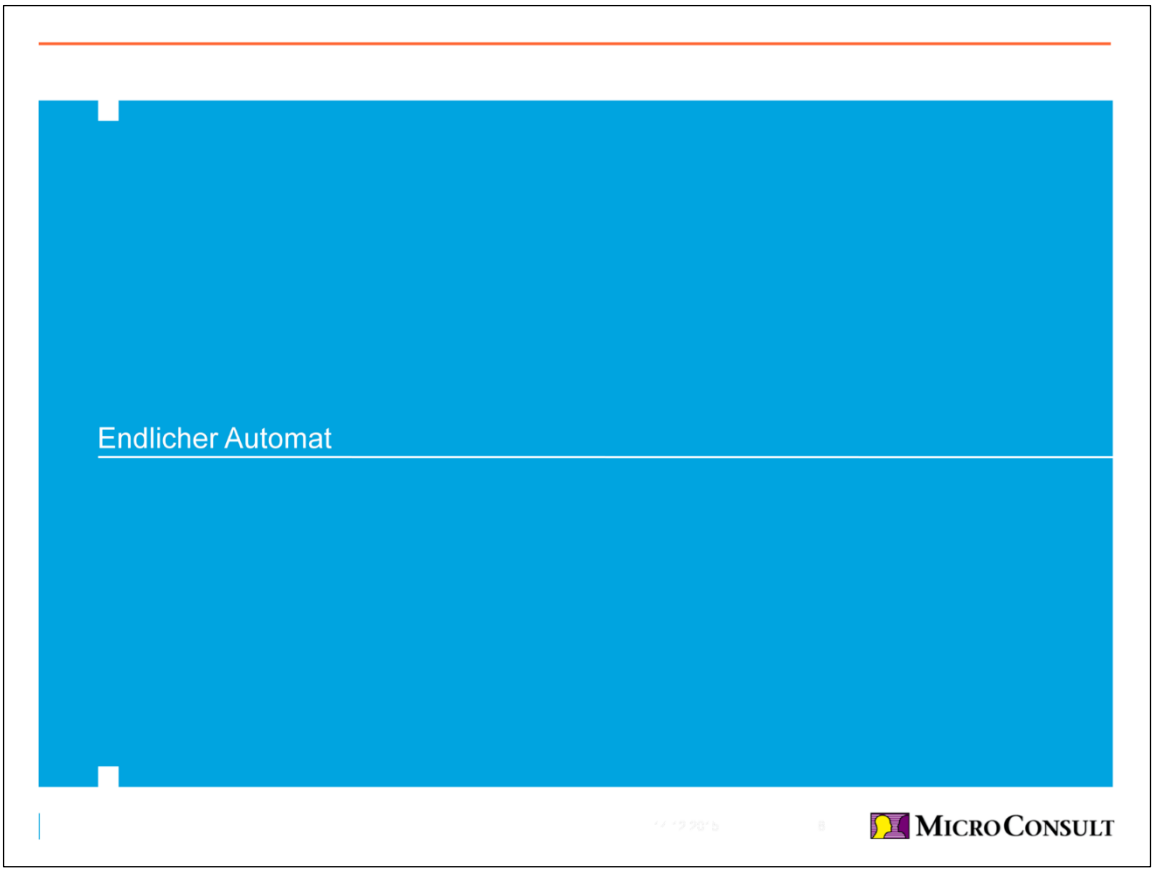
Wo ist das Problem des Beispiels?

Offensichtlich existiert versteckt im Code ein Zustands-automat. Da er aber hinter vielen Variablen versteckt wird, schafft das einige Probleme:

- Der Automat (seine Logik) ist von außen nicht erkennbar.
- Eine Veränderung oder Erweiterung des Automaten ist nur mit großem Aufwand möglich.
- Es besteht die Gefahr, dass durch kleine Codeänderungen der ganze Automat unbrauchbar wird.

→ Machen Sie den Automaten sichtbar!

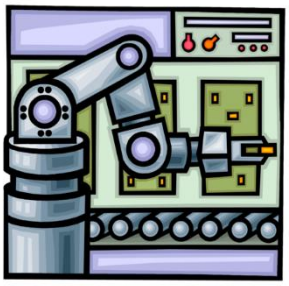
3 Endlicher Automat



Endlicher Automat

Ein **endlicher Automat** (auch Zustandsmaschine, englisch *finite state machine (FSM)*)

- Modelliert ein Verhalten, das aus Zuständen, Zustandsübergängen und Aktionen besteht.
- Er heißt endlich, weil die Menge der Zustände, die er annehmen kann, endlich ist.



Endlicher Automat

Ein **Zustand** zeigt den aktuellen Status an.

Ein **Zustandsübergang** (Transition) zeigt eine Änderung des Zustandes an.

Eine **Aktion** ist die Ausgabe des endlichen Automaten, die in einer bestimmten Situation erfolgt. Es gibt vier Typen von Aktionen:

- Eingangsaktion – wird beim Eintreten in einen Zustand ausgeführt.
- Ausgangsaktion – wird beim Verlassen eines Zustandes ausgeführt.
- Eingabeaktion – wird abhängig vom aktuellen Zustand und der Eingabe ausgeführt.
- Übergangsaktion – wird abhängig von einem Zustandsübergang ausgeführt.

3.1 Arten

Endlicher Automat – Arten

Generell werden zwei Gruppen von endlichen Automaten unterschieden:

Akzeptoren

Sie verarbeiten Eingabewerte und signalisieren durch ihren Zustand das Ergebnis nach außen. In der Regel werden Symbole (Buchstaben) als Eingabe benutzt.

Akzeptoren werden vorwiegend in der Wort- und Spracherkennung eingesetzt.

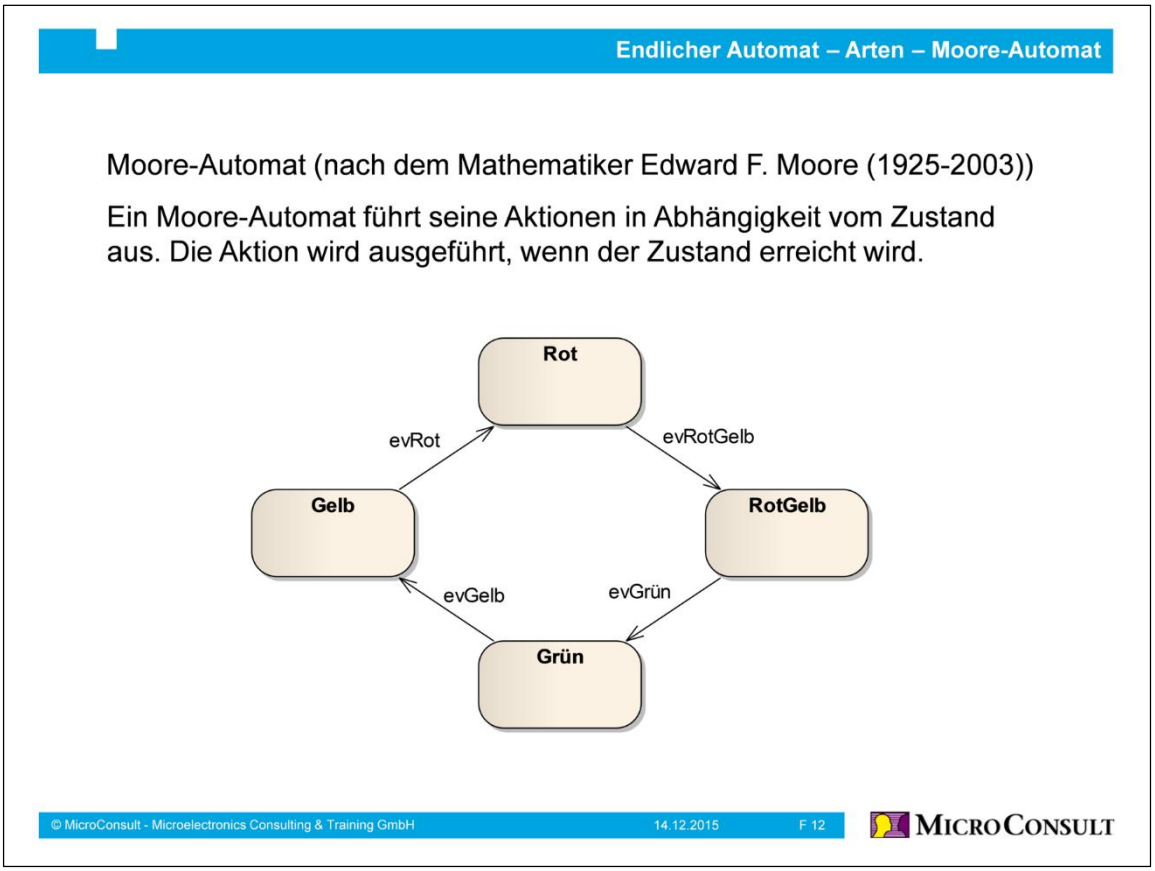
Transduktoren (Transducer)

Transduktoren führen Aktionen in Abhängigkeit von Zustand und Eingabesignal aus. Sie werden vorwiegend für Steuerungsaufgaben eingesetzt.

Es werden grundsätzlich zwei Typen unterschieden:

- Moore-Automat
- Mealy-Automat

3.1.1 Moore-Automat

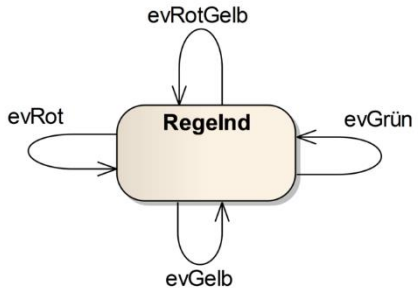


3.1.2 Mealy-Automat

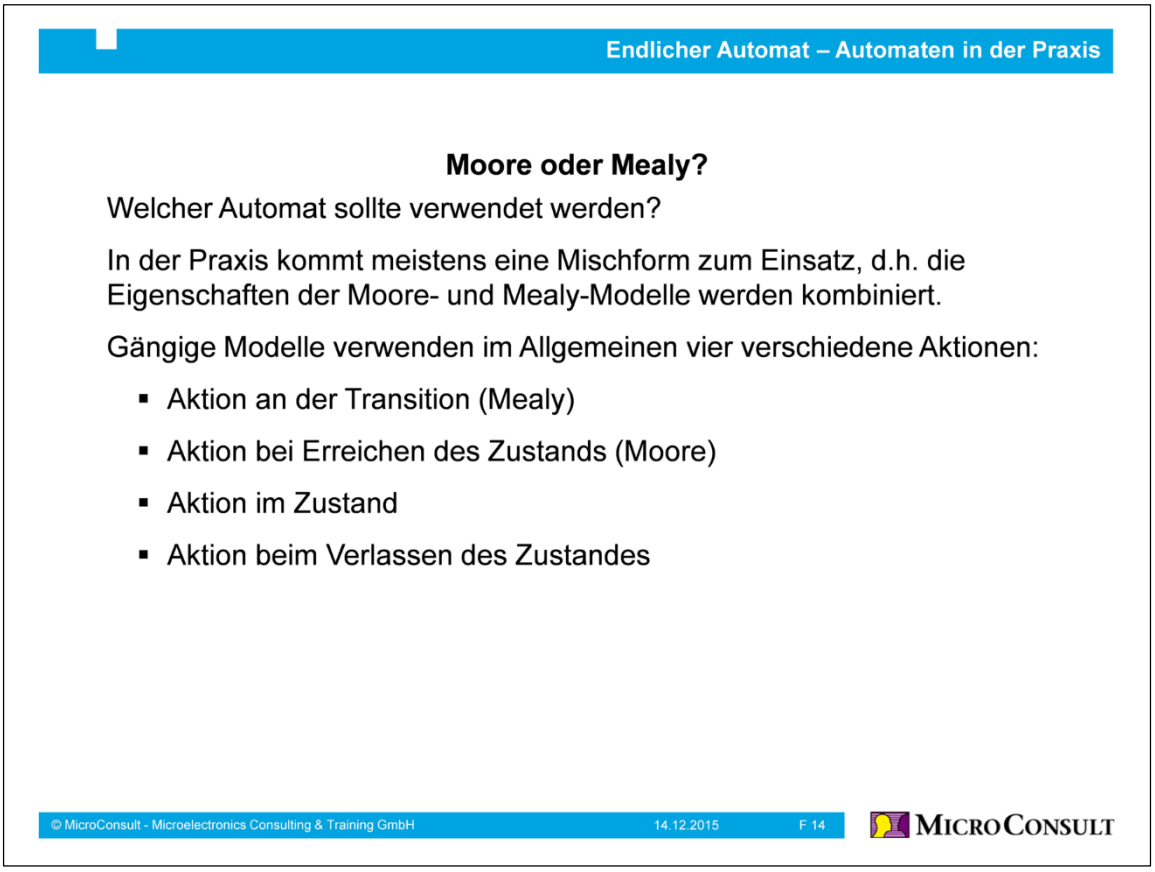
Endlicher Automat – Arten – Mealy-Automat

Mealy-Automat (nach dem Mathematiker George H. Mealy (1927-2010))

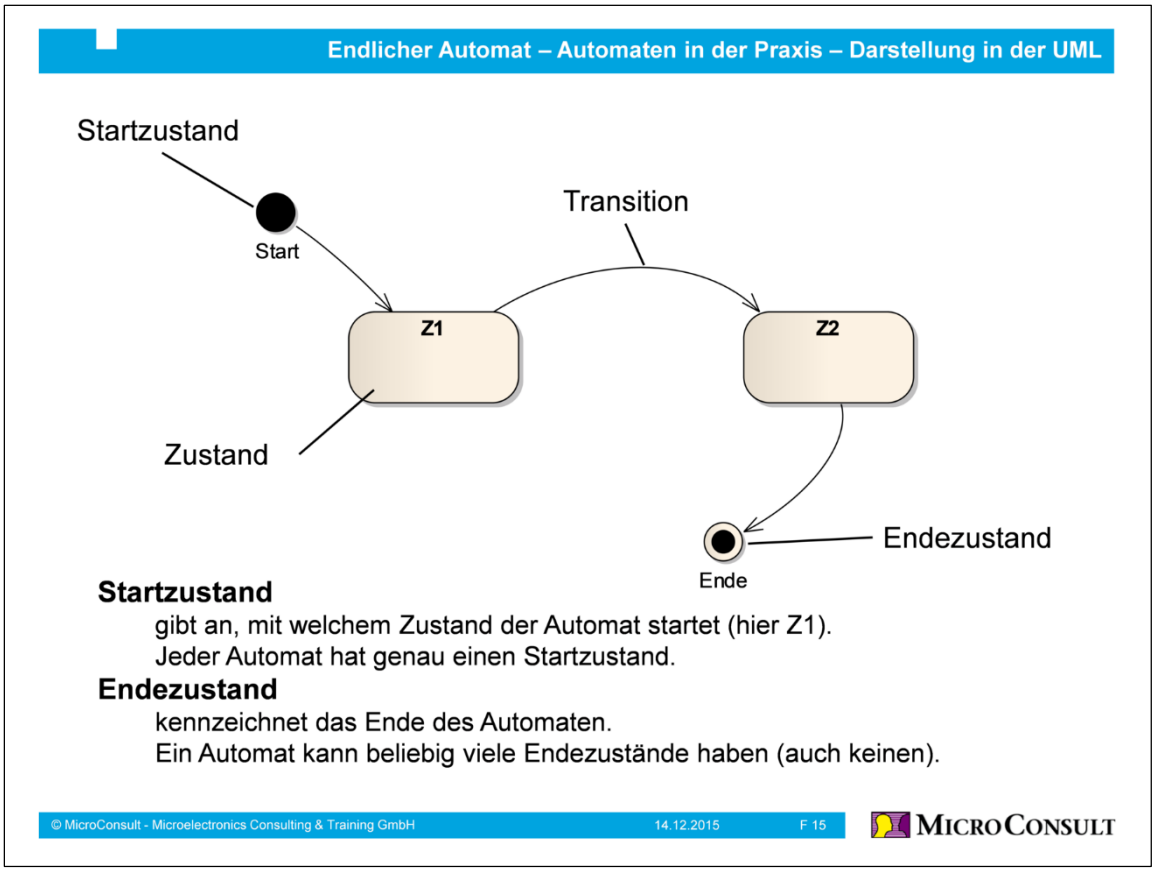
Ein Mealy-Automat führt seine Aktionen in Abhängigkeit vom Zustandsübergang aus. Die Aktion wird ausgeführt, wenn der Zustandsübergang stattfindet.

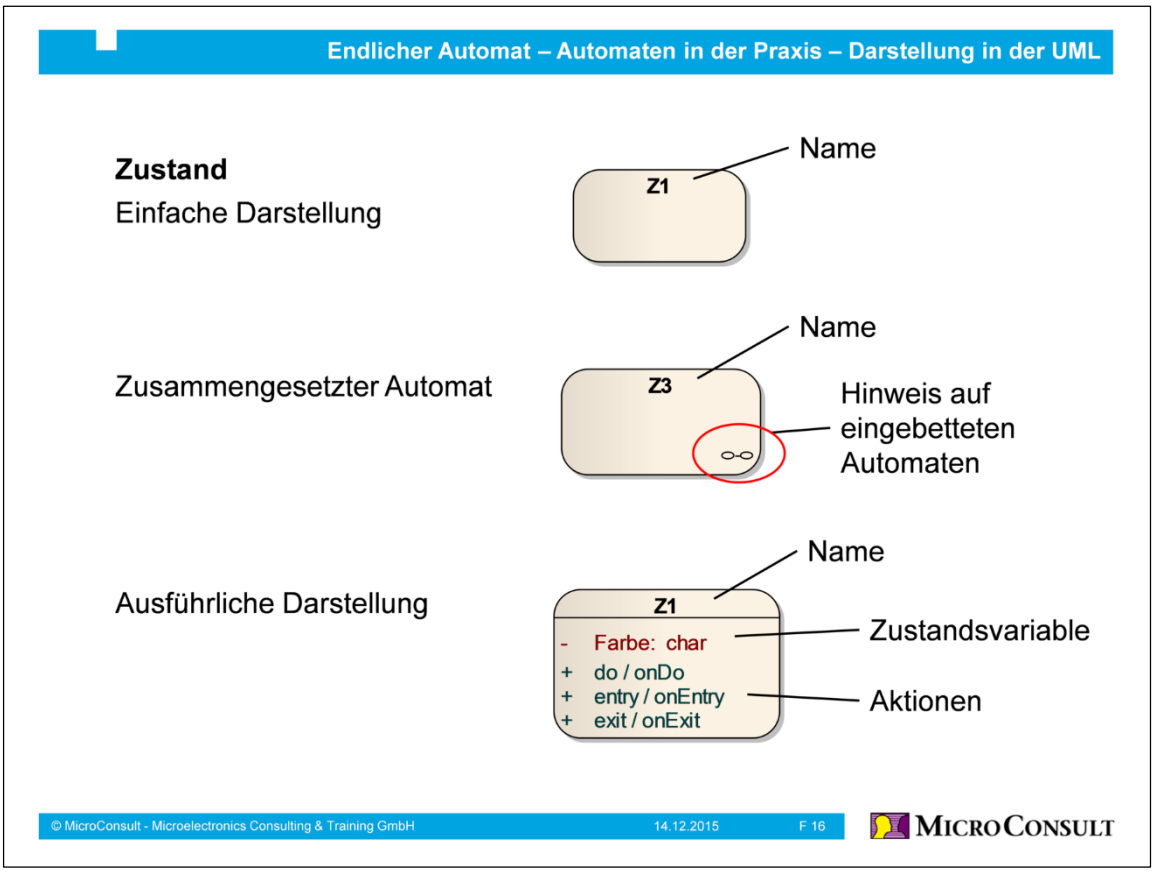


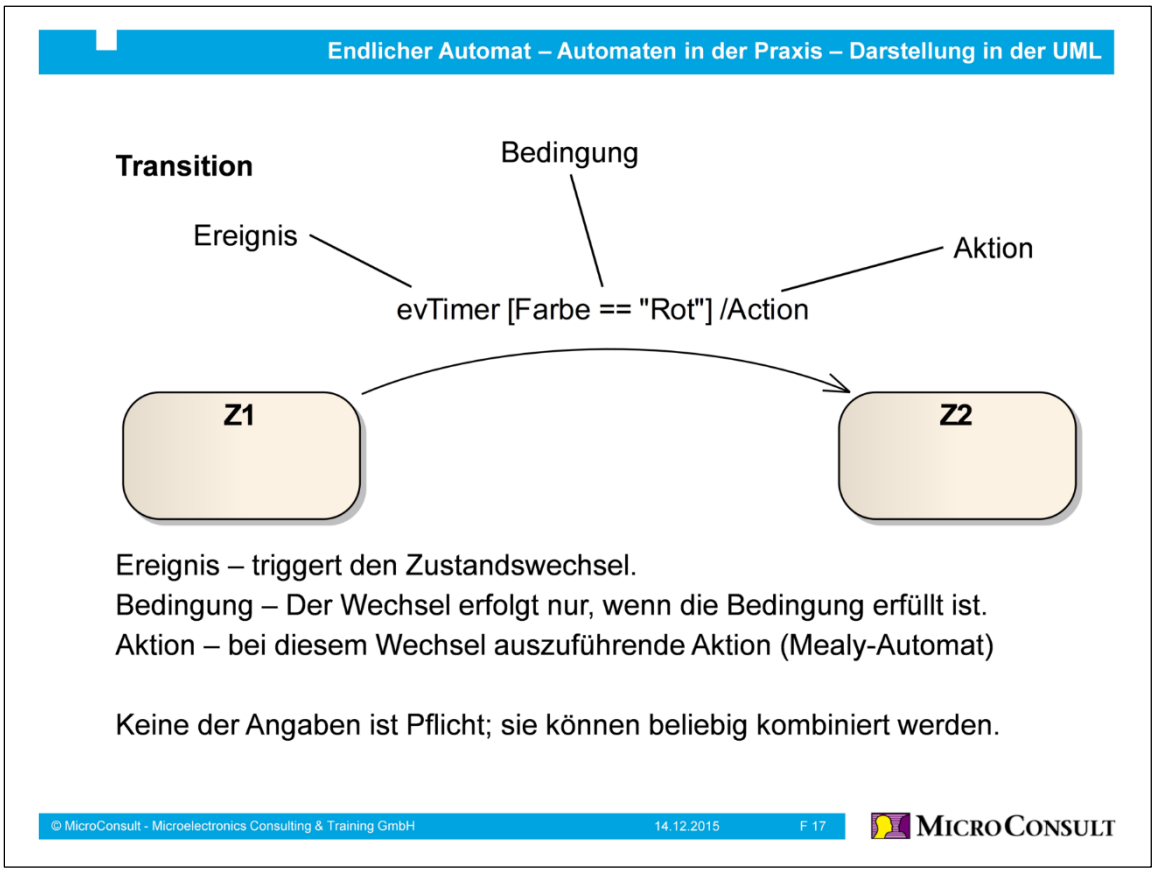
3.2 Automaten in der Praxis



3.2.1 Darstellung in der UML

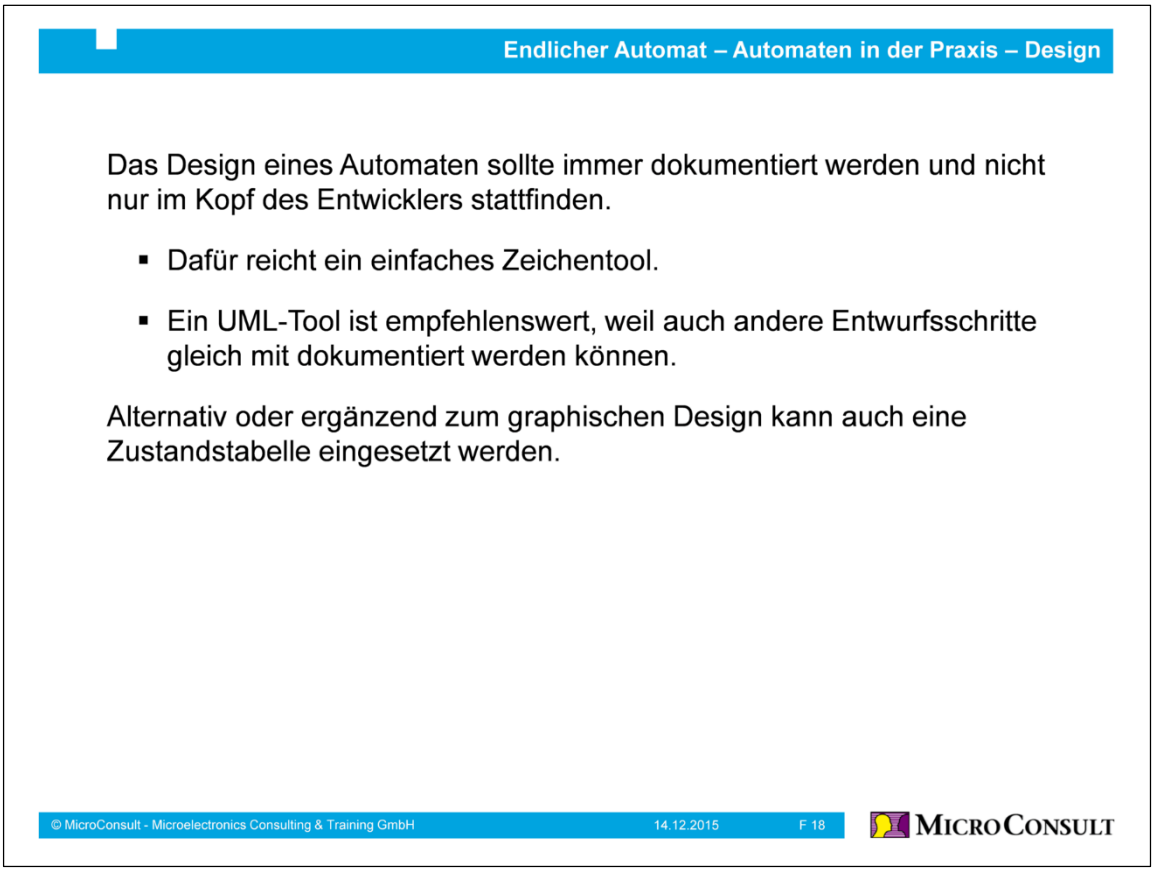




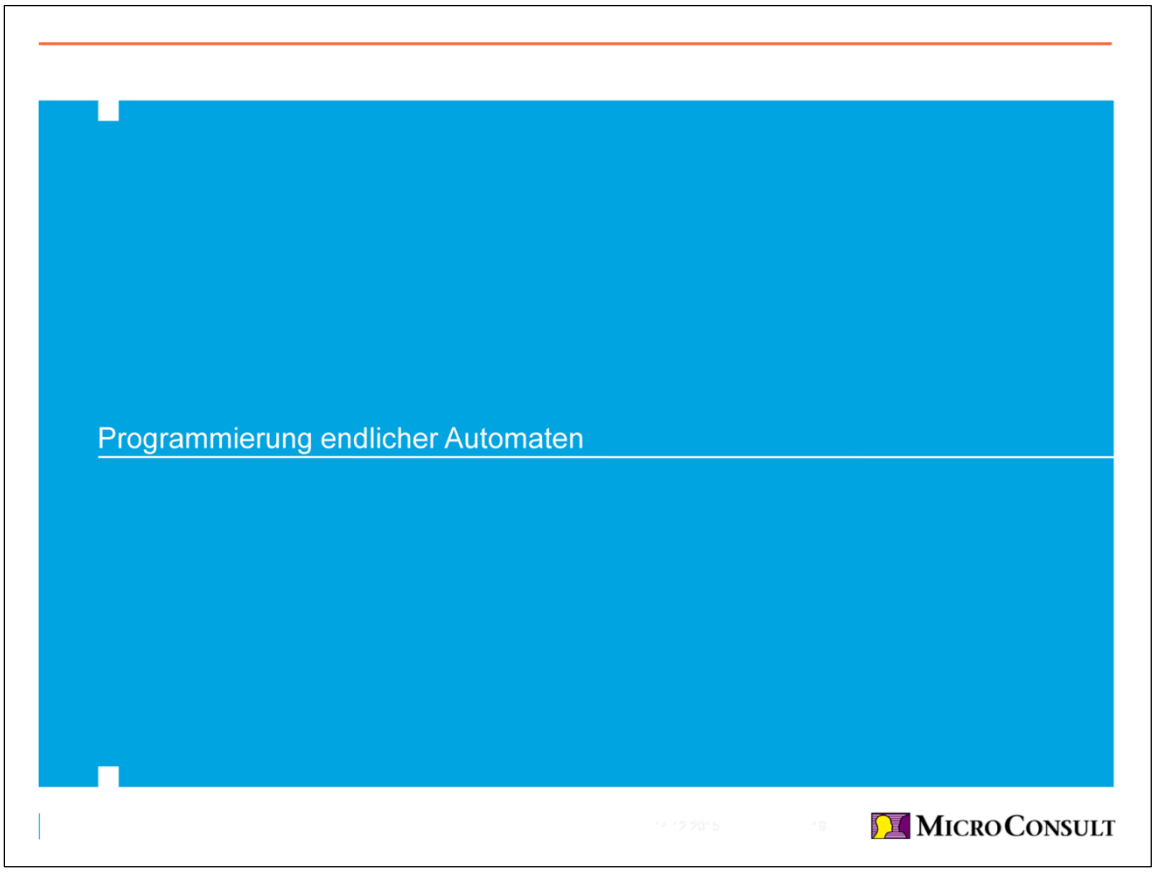


Abhängig von den Randbedingungen des Projekts werden nur Ereignisse oder nur Bedingungen oder eine Kombination aus beiden verwendet.

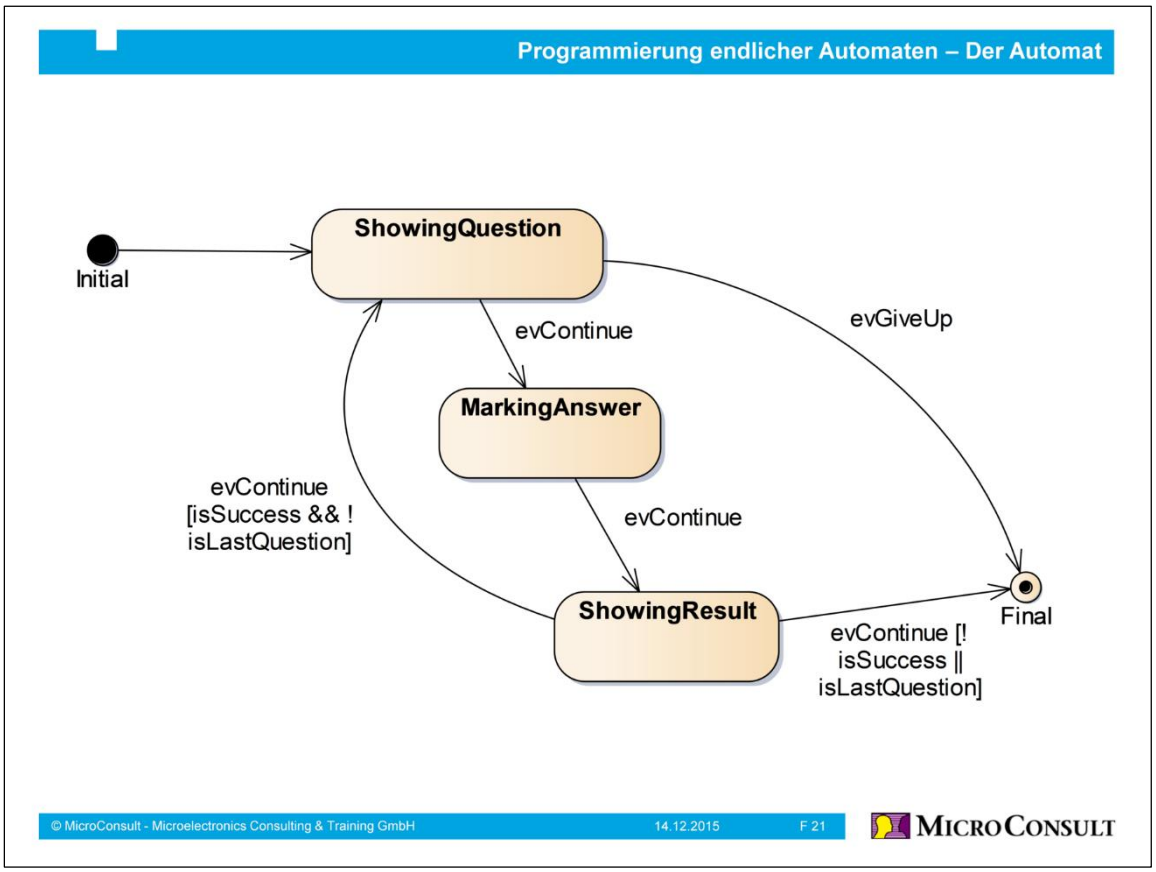
3.2.2 Design



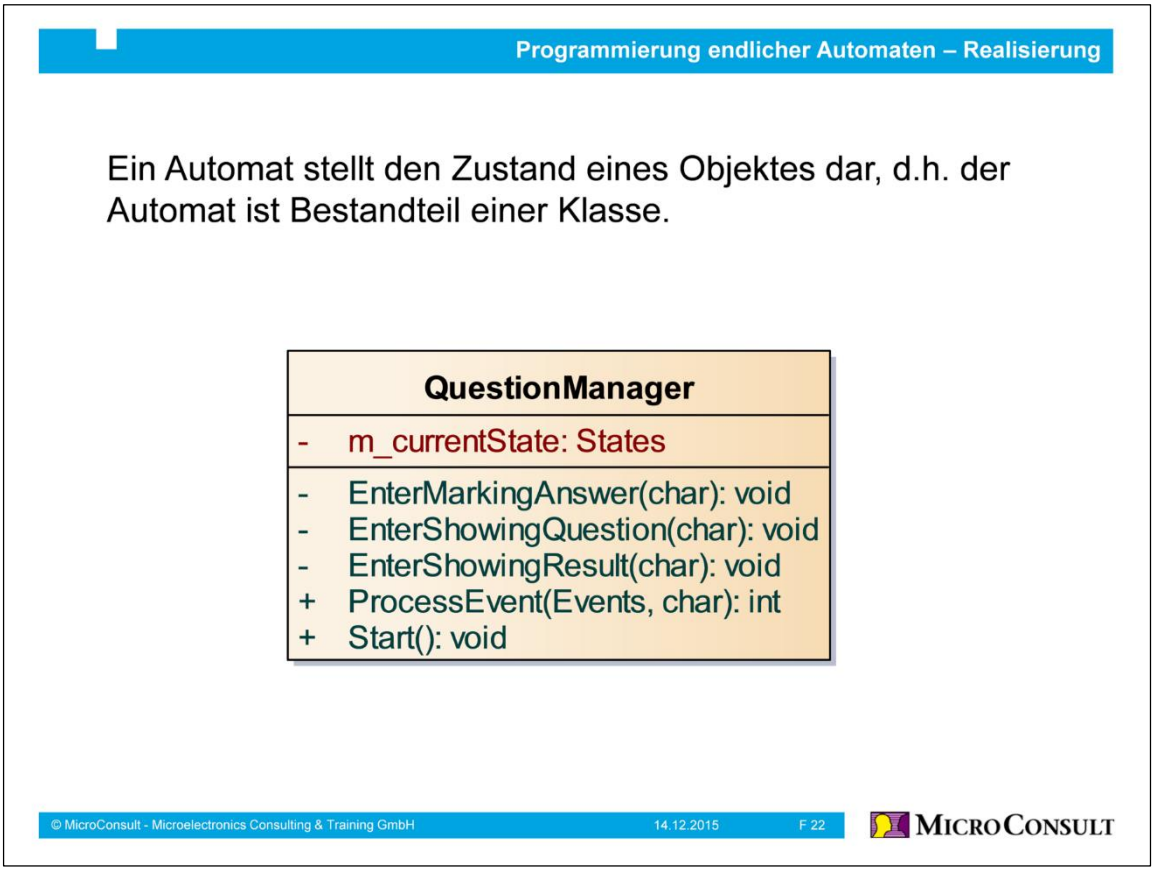
4 Programmierung endlicher Automaten



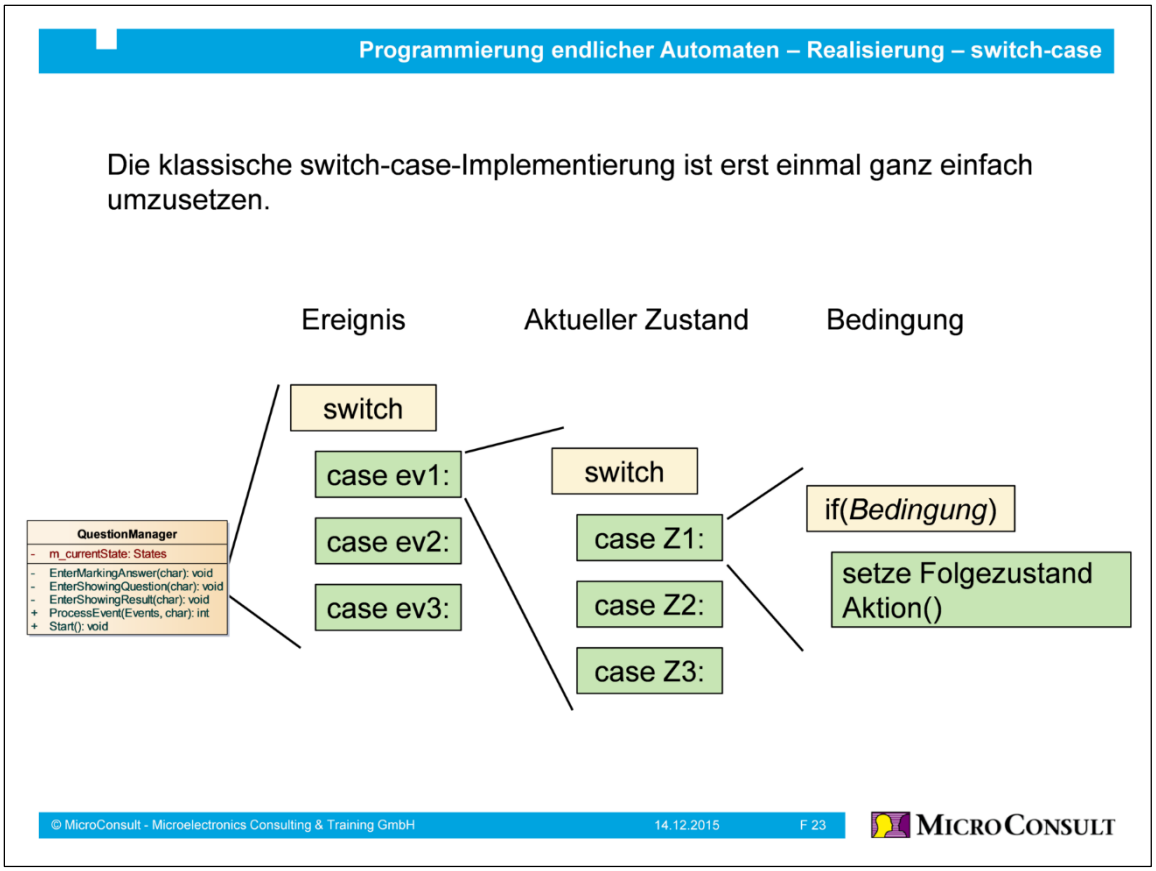
4.1 Der Automat


Programmierung endlicher Automaten – Der Automat
Initial
ShowingQuestion
evContinue
evGiveUp
MarkingAnswer
evContinue
[isSuccess && !
isLastQuestion]
evContinue
ShowingResult
Final
evContinue [!
isSuccess ||
isLastQuestion]
© MicroConsult - Microelectronics Consulting & Training GmbH
14.12.2015
F 21
MICRO CONSULT

4.2 Realisierung



4.2.1 switch-case



Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – switch-case

Vorteile

- einfaches Prinzip

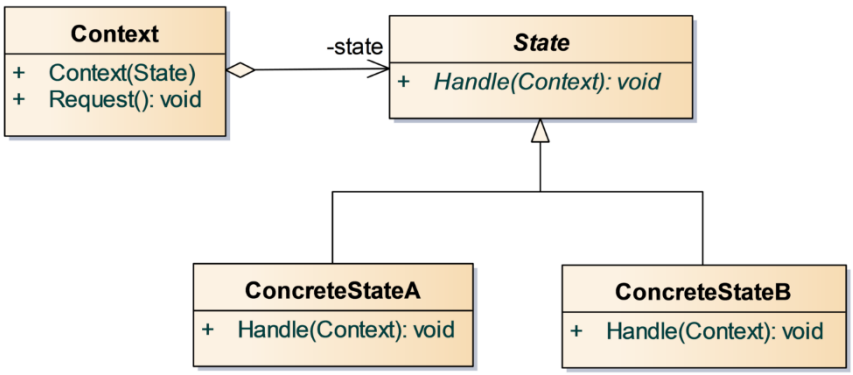
Nachteile

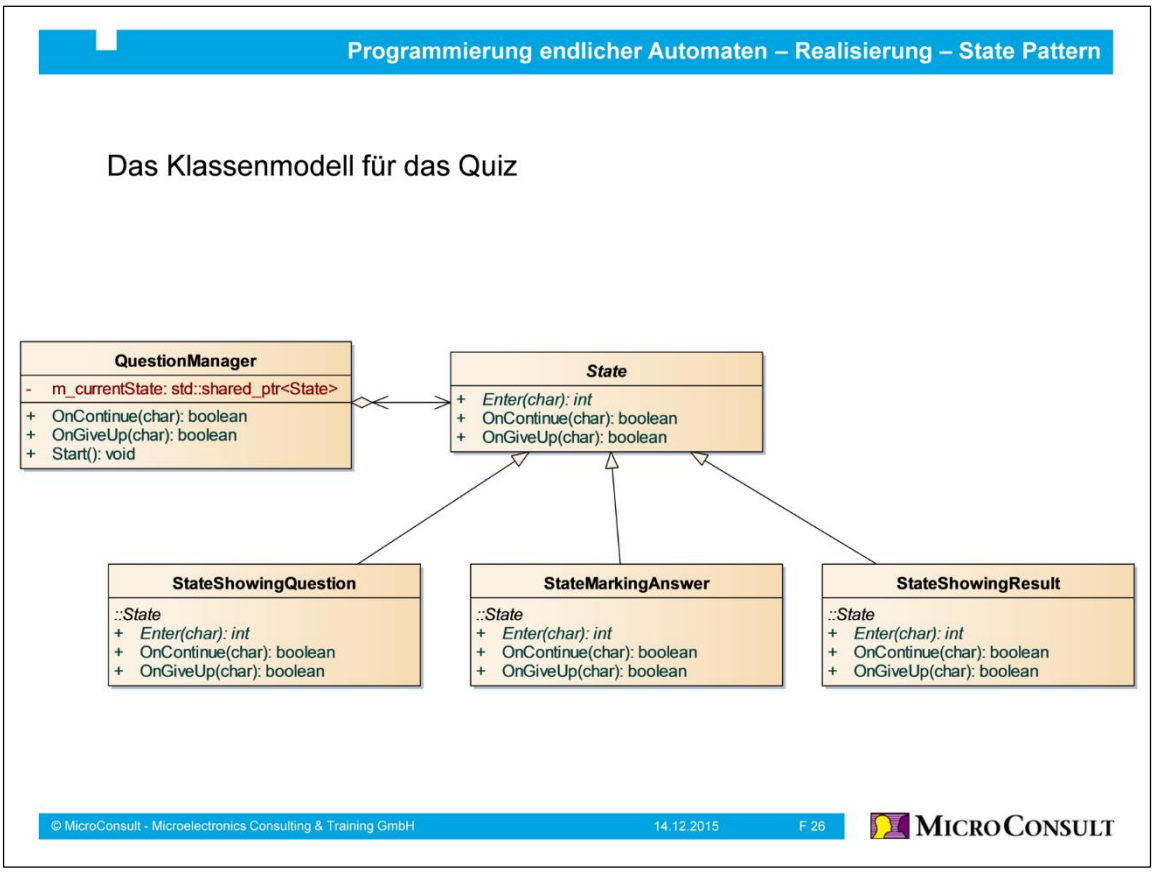
- Die Mechanik des Automaten wird mit der Funktionalität der Applikation verwoben.
  - Was gehört zum Automaten?
  - Was ist Funktionalität?
- Wird ein neuer Automat in die Applikation eingefügt, muss alles (auch der Automat selbst) komplett neu geschrieben werden.
- Schwer zu überblicken
- Hoher Testaufwand

4.2.2 State Pattern

Das State Pattern wurde von der Gang of Four (GoF) um Erich Gamma vorgestellt.

Hier wird die Objektorientierung etwas besser ausgenutzt als bei der einfachen switch-case-Implementierung.





Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – State Pattern

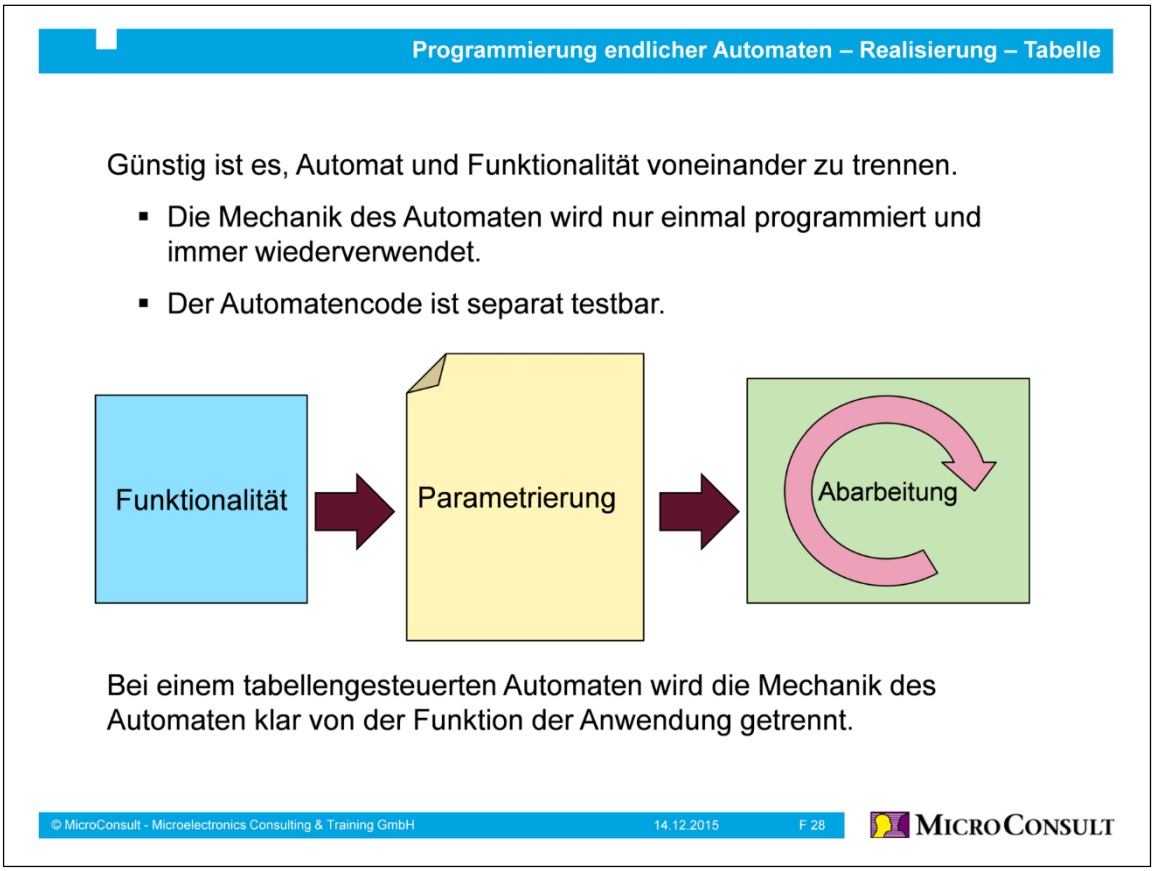
Vorteile

- Objektorientierter Ansatz
- Einfache Erweiterung, ein Zustand kann sehr leicht hinzugefügt werden
- Ausnutzung der Vererbung bei gleicher Funktionalität in mehreren Zuständen möglich

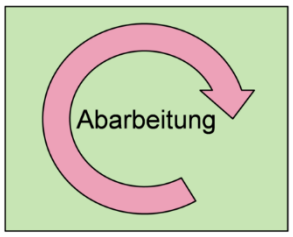
Nachteile

- Eventuell große Anzahl von Klassen – eine pro Zustand
- Die Mechanik des Automaten ist immer noch nicht klar von der Funktionalität der Applikation getrennt

4.2.3 Tabelle



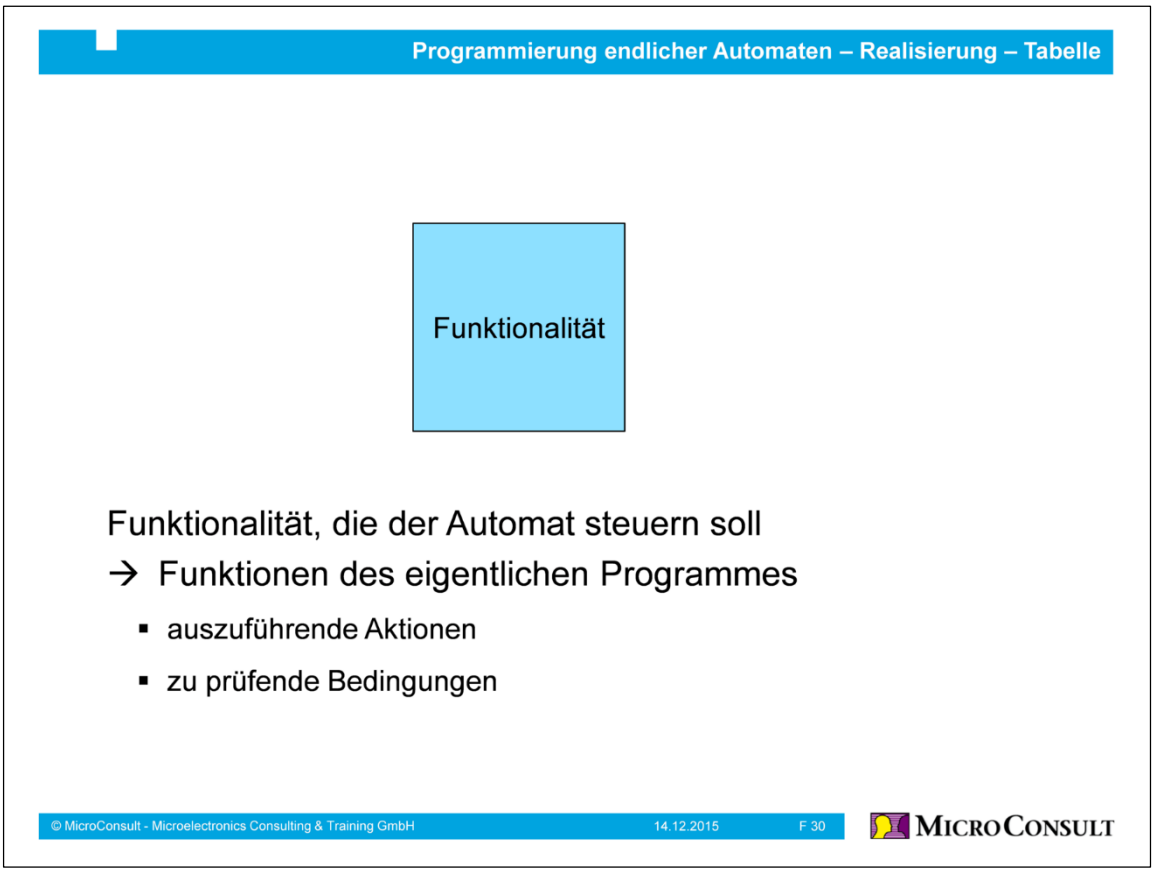
Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Tabelle



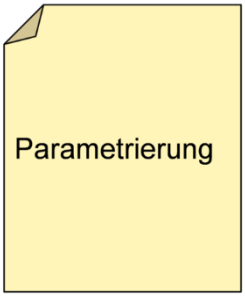
Mechanik des Automaten

→ Funktion zur Abarbeitung der Tabelle

- durchsucht die Tabelle nach einem passenden Eintrag
- arbeitet alle Anweisungen des gefundenen Eintrags ab



Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Tabelle

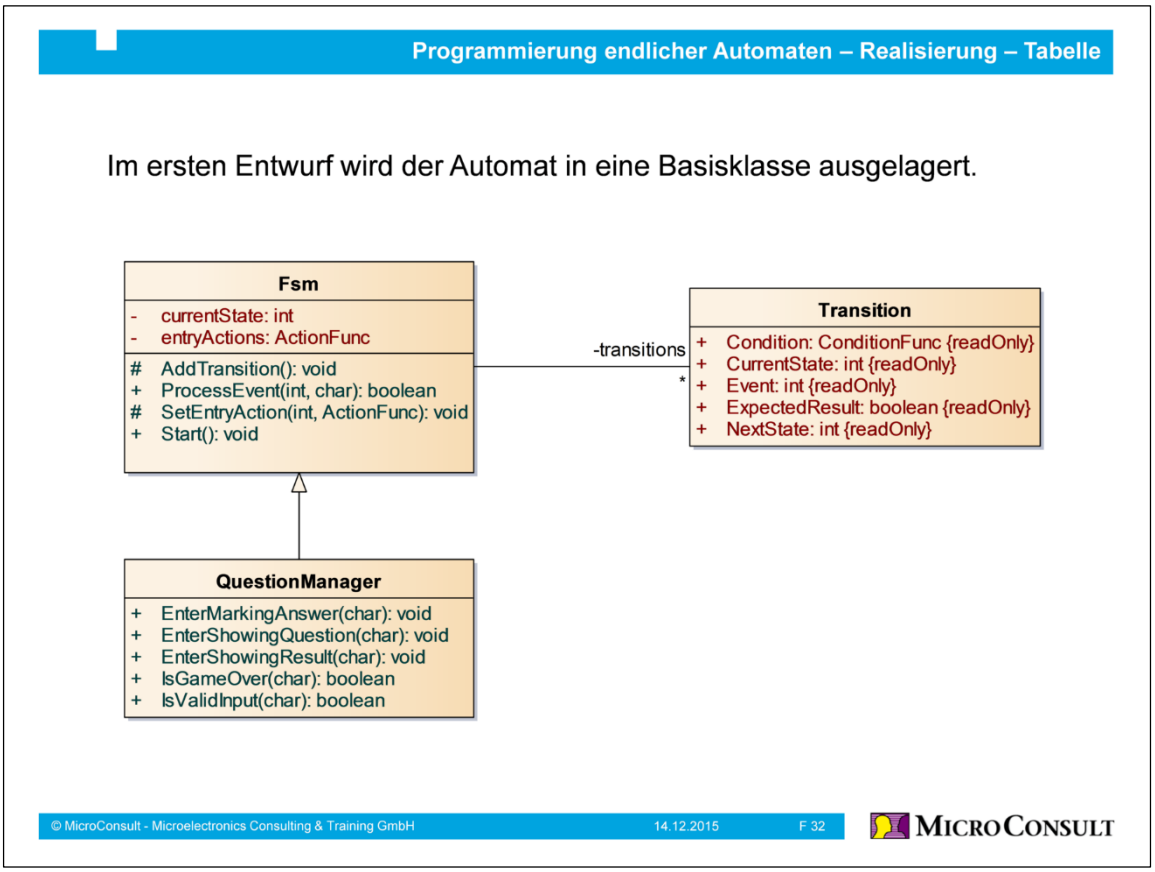


Beschreibung des Automaten

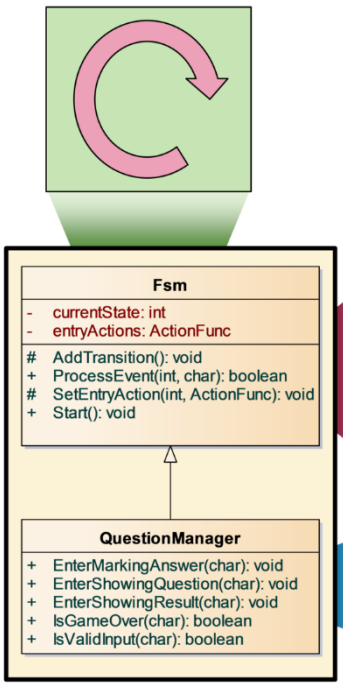
→ Zustand-Ereignis-Tabelle

- enthält die Beschreibungen für alle Transitionen des Automaten

4.2.3.1 Automat als Basisklasse



Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Tabelle

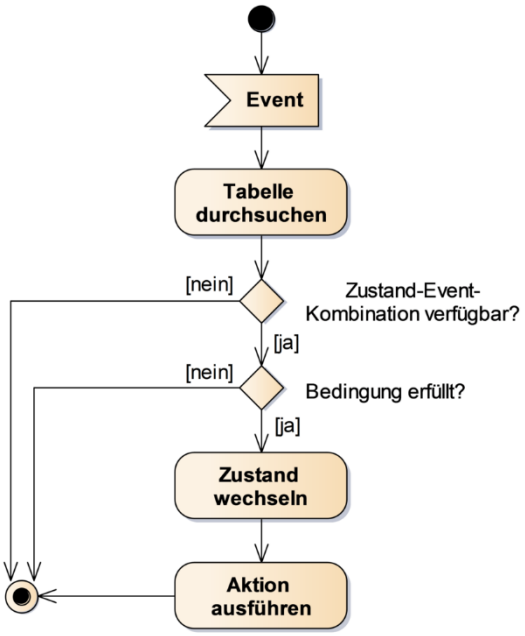


Startzustand	Event	Bedingung	Erwartetes Ergebnis	Folgezustand
Start	-	.	-	ShowingQuestion
ShowingQuestion	evContinue	ValidInput	true	MarkingAnswer
ShowingQuestion	evGiveUp	-	-	Ende
MarkingAnswer	evContinue	-	-	ShowingResult
ShowingResult	evContinue	GameOver	false	ShowingQuestion
ShowingResult	evContinue	GameOver	true	Ende

Zustand	Aktion
ShowingQuestion	EnterShowingQuestion
MarkingAnswer	EnterMarkingAnswer
ShowingResult	EnterShowingResult

Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Tabelle

Programmablauf
bei der Bearbeitung
eines Ereignisses



Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Tabelle

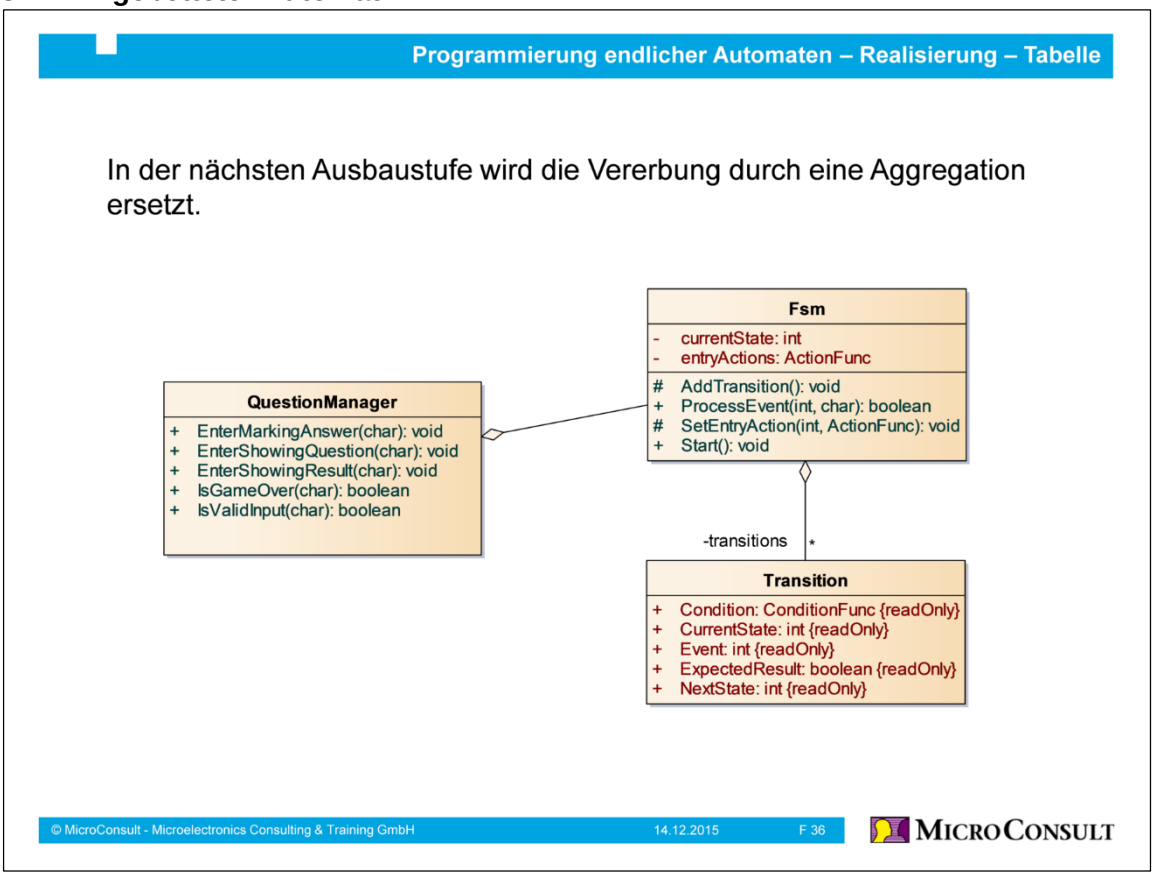
Vorteile:

- Klare Trennung von Automat und Verhalten
- Einfaches Prinzip
- Direkter Bezug von Transition im Modell des Automaten zu dem entsprechenden Tabelleneintrag

Nachteile:

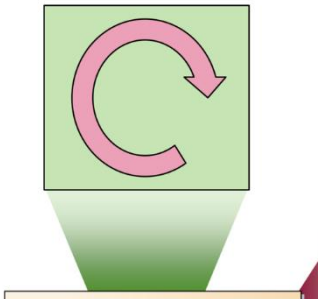
- Im schlimmsten Fall müssen alle Tabelleneinträge durchsucht werden.
- Durch die Vererbung gibt es eine starke Abhängigkeit zwischen Automat und Realisierung.
- Nur Memberfunktionen können als Bedingung oder Aktion verwendet werden.

4.2.3.2 Eingebetteter Automat



Es muss nicht zwingend mit Aggregation gearbeitet werden. Durch die klare Trennung der Klassen kann das Automatenobjekt auch außerhalb der benutzenden Klasse erzeugt werden. Damit würde die Kopplung noch loser.

Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Tabelle



Fsm

- currentState: int
- entryActions: ActionFunc

AddTransition(): void
+ ProcessEvent(int, char): boolean
# SetEntryAction(int, ActionFunc): void
+ Start(): void

QuestionManager

+ EnterMarkingAnswer(char): void
+ EnterShowingQuestion(char): void
+ EnterShowingResult(char): void
+ IsGameOver(char): boolean
+ IsValidInput(char): boolean

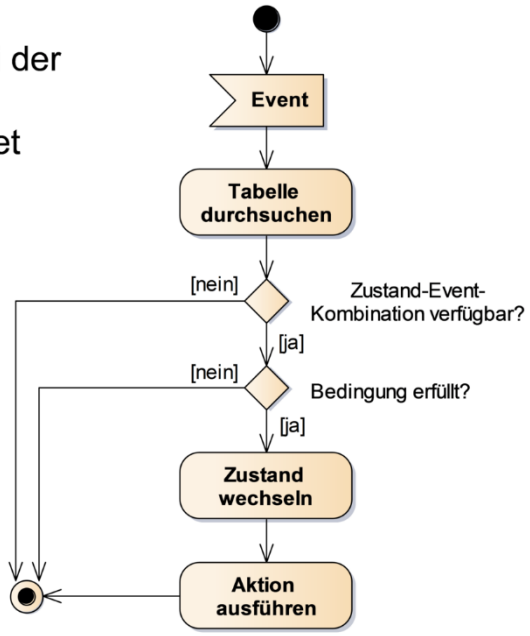
Startzustand	Event	Bedingung	Erwartetes Ergebnis	Folgezustand
Start	-	.	-	ShowingQuestion
ShowingQuestion	evContinue	ValidInput	true	MarkingAnswer
ShowingQuestion	evGiveUp	-	-	Ende
MarkingAnswer	evContinue	-	-	ShowingResult
ShowingResult	evContinue	GameOver	false	ShowingQuestion
ShowingResult	evContinue	GameOver	true	Ende

Zustand	Aktion
ShowingQuestion	EnterShowingQuestion
MarkingAnswer	EnterMarkingAnswer
ShowingResult	EnterShowingResult

MICRO CONSULT

Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Tabelle

Der Programmablauf bei der Bearbeitung eines Ereignisses unterscheidet sich nicht von der Vererbungs-Variante



Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Tabelle

Bei der Variante "FSM als Basisklasse" können nur Memberfunktionen als Bedingungs- oder Aktionsfunktion verwendet werden. Es ist sogar noch ein (unschöner) cast notwendig, um den Code übersetzen zu können.

```
AddTransition(
    static_cast<int>(States::ShowingQuestion),          // Startzustand
    static_cast<int>(Events::evContinue),               // Event
    static_cast<ConditionFunc>(&QuestionManager::IsValidInput), // Bedingung
    true,                                               // erwartetes Ergebnis
    static_cast<int>(States::MarkingAnswer));           // Folgezustand
```

In der neuen Variante soll es nun möglich sein, beliebige Funktionen zu verwenden.

Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Tabelle

In der Transition wird der Funktionspointer auf eine Memberfunktion durch ein `std::function`-Objekt ersetzt.

```
using ConditionFunc = bool (Fsm::*)(char) const;
using ActionFunc = void (Fsm::*)(char);
```

```
using ConditionFunc = std::function<bool(char)>;
using ActionFunc = std::function<void(char)>;
```

Dadurch kann in einer Transition eine beliebige Funktion mit der angegebenen Signatur gespeichert werden.

Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Tabelle

Normale Funktion:

```
m_fsmQuestions.AddTransition(
    static_cast<int>(States::ShowingQuestion),
    static_cast<int>(Events::evContinue),
    ::IsValidInput,
    true,
    static_cast<int>(States::MarkingAnswer));
```

Jetzt können auch Lambda-Ausdrücke verwendet werden:

```
m_fsmQuestions.AddTransition(
    static_cast<int>(States::ShowingQuestion),
    static_cast<int>(Events::evContinue),
    [](char data) { return data >= 'a' && data <= 'd'; },
    true,
    static_cast<int>(States::MarkingAnswer));
```


MICRO CONSULT

Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Tabelle

Wenn allerdings eine Memberfunktion angegeben wird, kommt es zu einem Compilerfehler (Failed to specialize function template 'unknown-type `std::invoke(_Callable &&,_Types &&...)`'):

```
m_fsmQuestions.AddTransition(
    static_cast<int>(States::ShowingQuestion),
    static_cast<int>(Events::evContinue),
    &QuestionManager::IsValidInput,
    true,
    static_cast<int>(States::MarkingAnswer));
```

Das liegt am `this`-Pointer, der implizit übergeben wird (die Memberfunktion hat einen Parameter mehr).

Dadurch passt die Signatur der Memberfunktion (2 Parameter) nicht zur verlangten Signatur (1 Parameter).

Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Tabelle

Die Standardbibliothek hat eine Lösung: `std::bind()`.

Der `this`-Pointer wird fest an den Aufruf gebunden. Der zweite Parameter wird durchgereicht. Dadurch wird die vorhandene Signatur an die geforderte angepasst.

```
m_fsmQuestions.AddTransition(
    static_cast<int>(States::ShowingQuestion),
    static_cast<int>(Events::evContinue),
    bind(&QuestionManager::IsValidInput, this, _1),
    true,
    static_cast<int>(States::MarkingAnswer));
```

Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Tabelle

Vorteile:

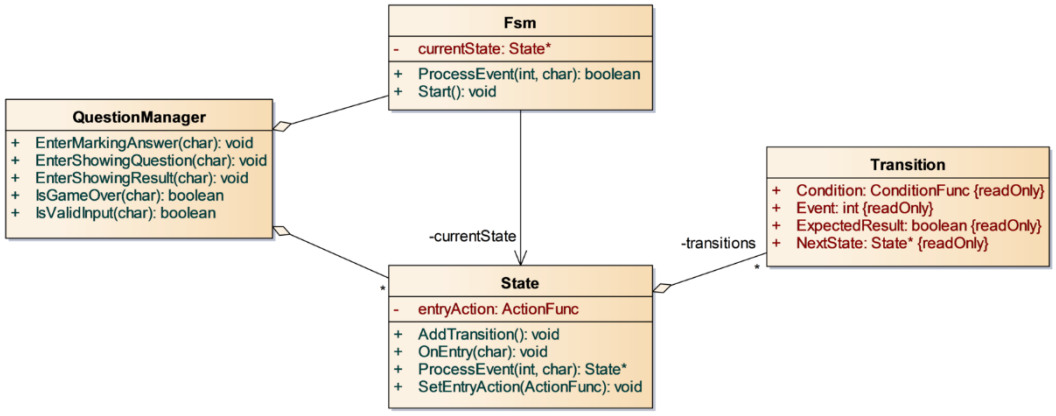
- Klare Trennung von Automat und Verhalten
- Einfaches Prinzip
- Direkter Bezug von Transition im Modell des Automaten zu dem entsprechenden Tabelleneintrag
- Lose Kopplung zwischen Automat und Realisierung
- Beliebige Funktionen können als Bedingung oder Aktion verwendet werden.

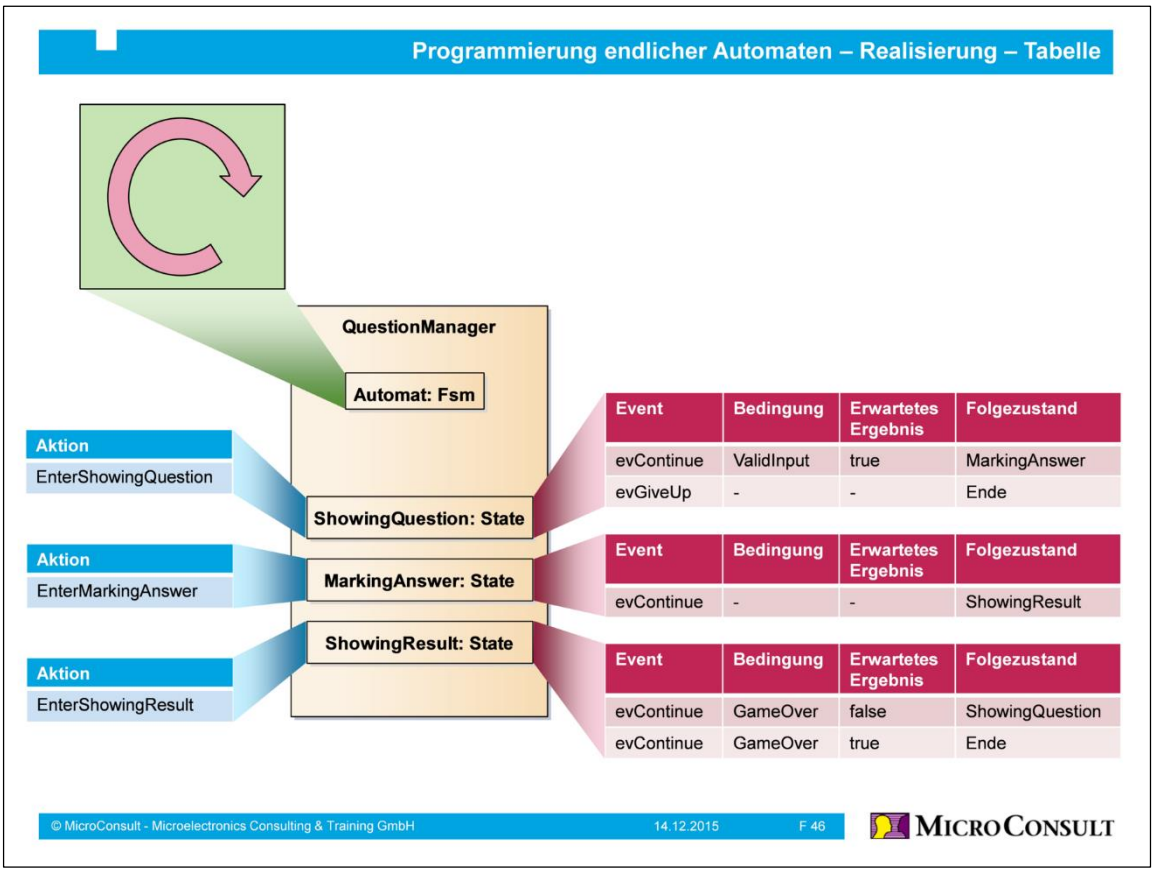
Nachteile:

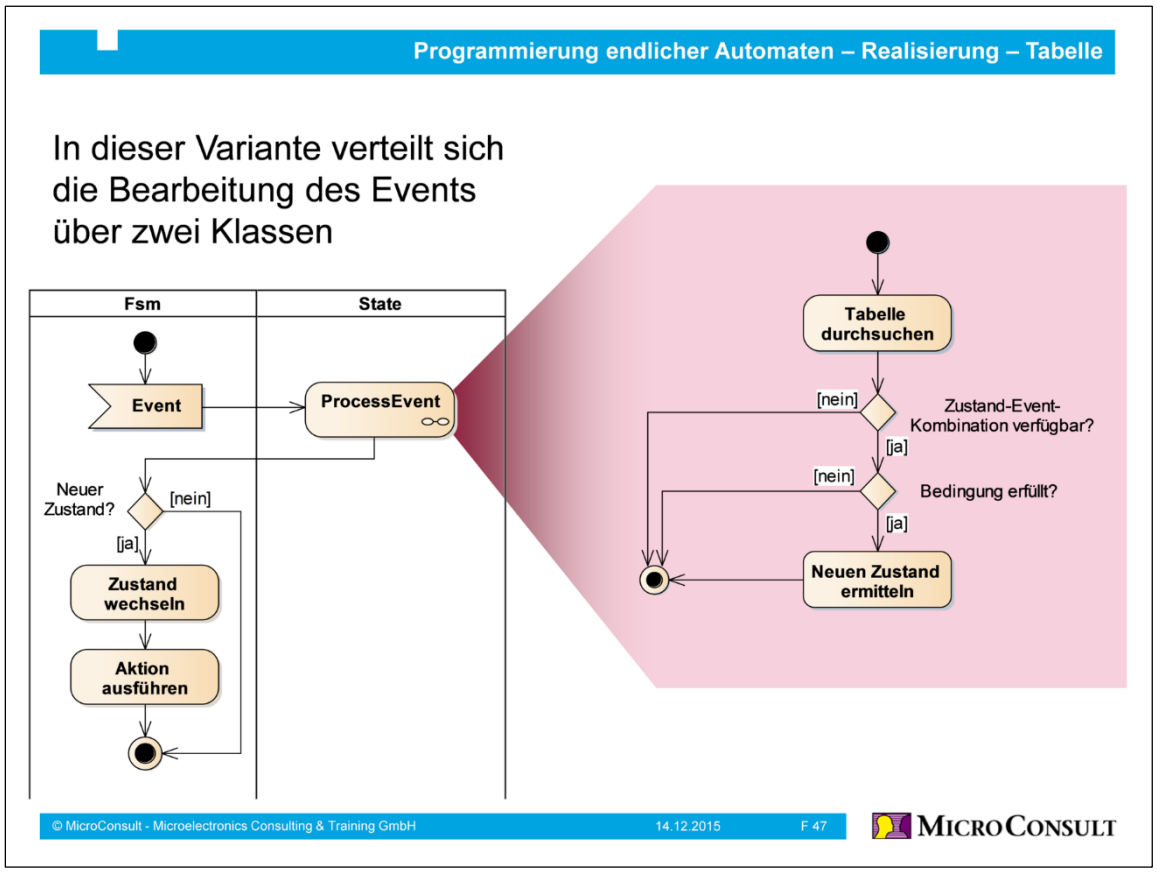
- Im schlimmsten Fall müssen alle Tabelleneinträge durchsucht werden.

Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Tabelle

Um die große Tabelle im Automaten zu ersetzen, dient das State Pattern als Inspiration. Der Zustand wird zur Klasse. Allerdings werden die Zustände eines Automaten nicht als Klasse, sondern als Objekt abgebildet.






Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Tabelle
In dieser Variante verteilt sich die Bearbeitung des Events über zwei Klassen
Fsm
State
Event
ProcessEvent
Neuer Zustand?
[nein]
[ja]
Zustand wechseln
Aktion ausführen
Tabelle durchsuchen
[nein]
Zustand-Event-Kombination verfügbar?
[ja]
[nein]
Bedingung erfüllt?
[ja]
Neuen Zustand ermitteln
© MicroConsult - Microelectronics Consulting & Training GmbH
14.12.2015
F 47
MICRO CONSULT

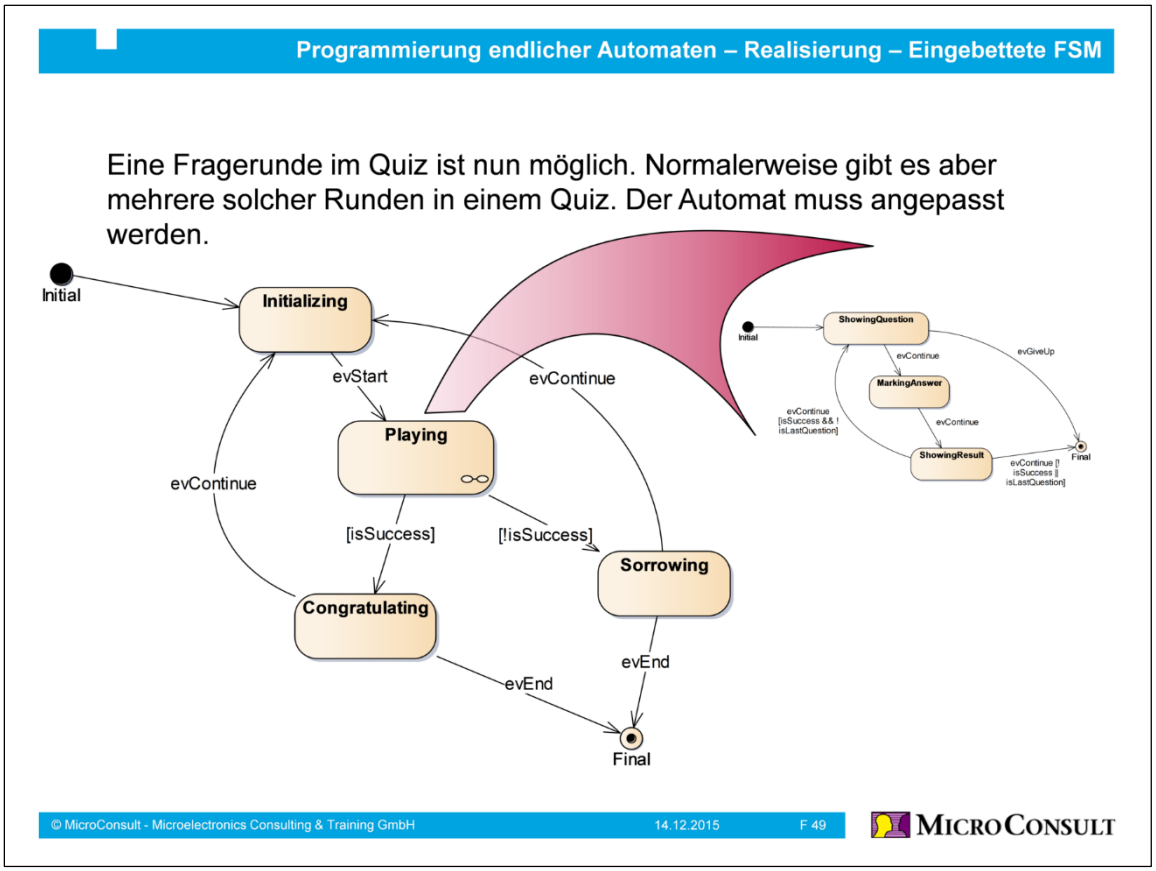
Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Tabelle

Vorteile:

- Klare Trennung von Automat und Verhalten
- Einfaches Prinzip (die komplexere Struktur ist von außen nicht sichtbar)
- Direkter Bezug von Transition im Modell des Automaten zu dem entsprechenden Tabelleneintrag
- Lose Kopplung zwischen Automat und Realisierung
- Beliebige Funktionen können als Bedingung oder Aktion verwendet werden.

- Es müssen nur noch sehr kurze Tabellen durchsucht werden.

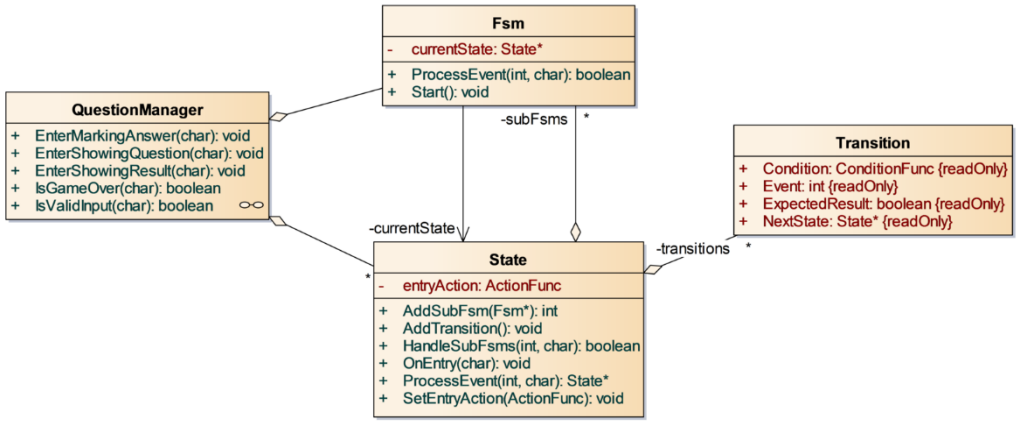
4.2.4 Eingebettete FSM



Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Eingebettete FSM

Auf den ersten Blick hat sich nichts geändert. Die meisten Änderungen sind intern. Lediglich die Klasse State bekommt drei neue Member:

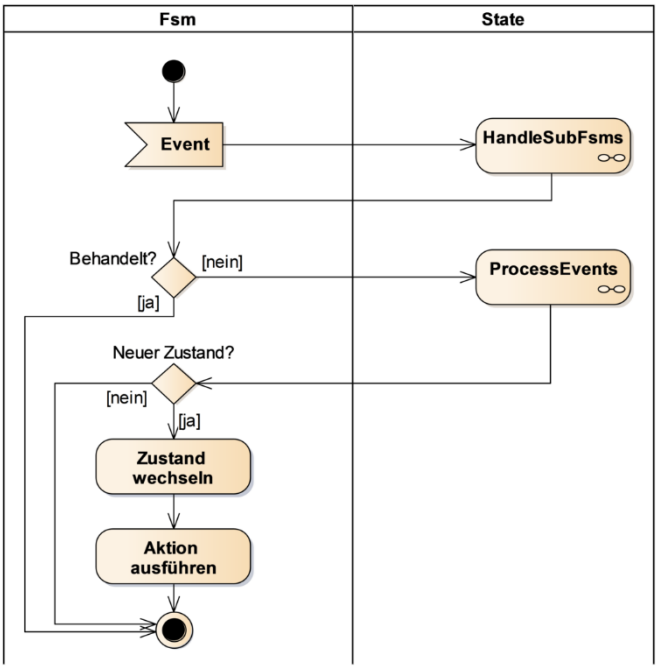
- `subFsms`
- `AddSubFsm()`
- `HandleSubFsms()`



MICRO CONSULT

Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Eingebettete FSM

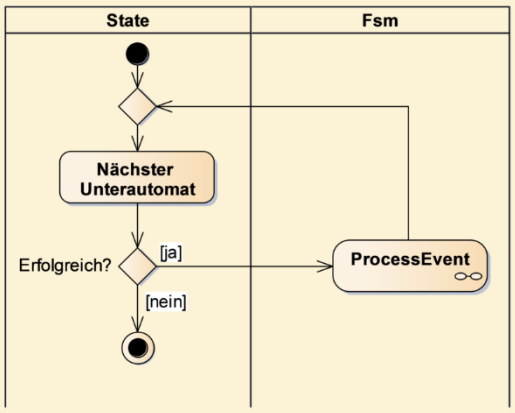
Bevor der Zustand selbst das Ereignis bearbeitet, wird geprüft, ob ein untergeordneter Automat für dieses Ereignis zuständig ist.



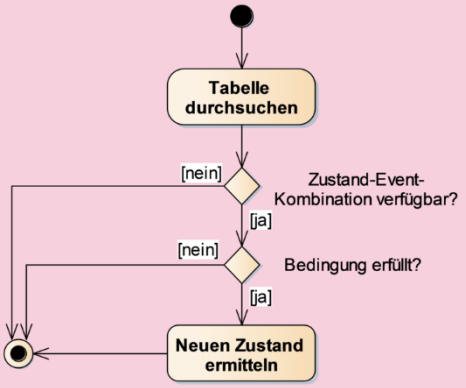
Programmierung endlicher Automaten – Realisierung – Eingebettete FSM

Die Klasse `State` übernimmt die Kontrolle der untergeordneten Automaten.

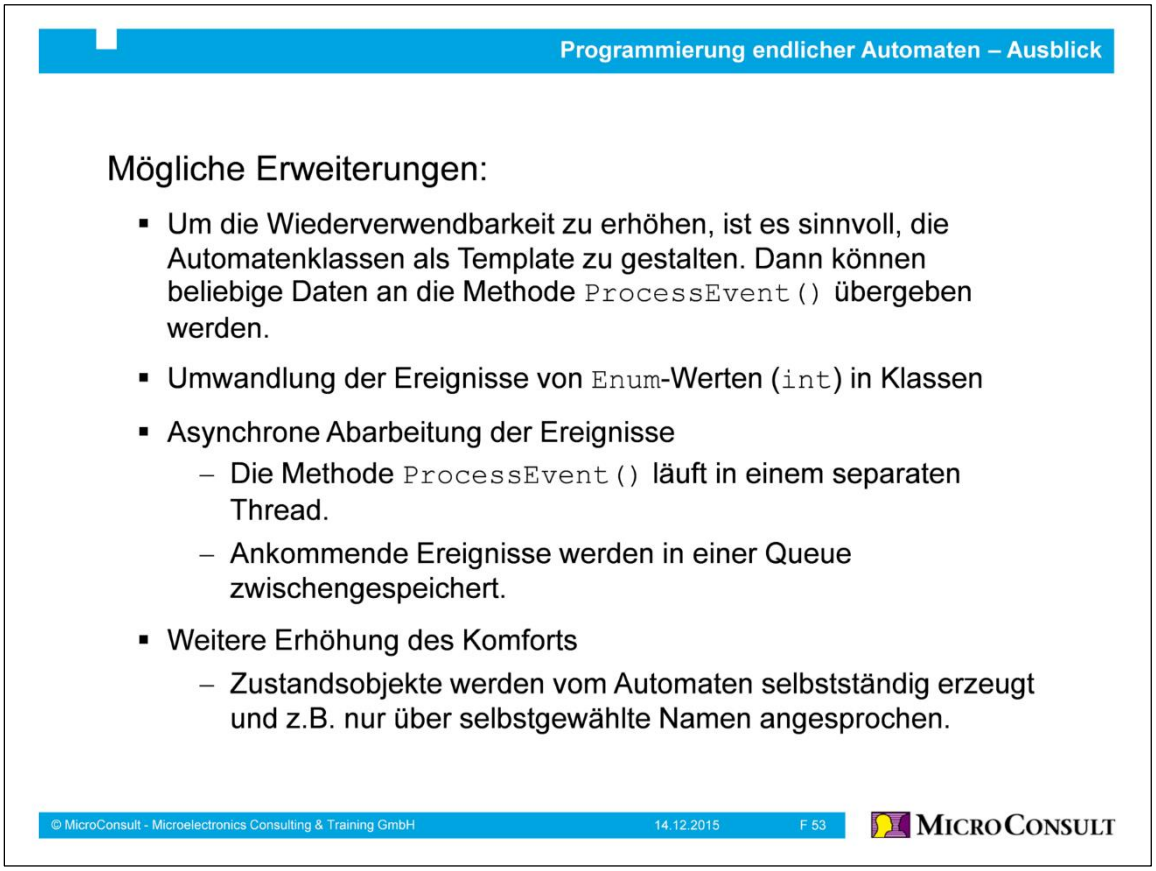
HandleSubFsms



ProcessEvent



4.3 Ausblick


Programmierung endlicher Automaten – Ausblick
Mögliche Erweiterungen:
Um die Wiederverwendbarkeit zu erhöhen, ist es sinnvoll, die Automatenklassen als Template zu gestalten. Dann können beliebige Daten an die Methode ProcessEvent() übergeben werden.
Umwandlung der Ereignisse von Enum-Werten (int) in Klassen
Asynchrone Abarbeitung der Ereignisse
Die Methode ProcessEvent() läuft in einem separaten Thread.
Ankommende Ereignisse werden in einer Queue zwischengespeichert.
Weitere Erhöhung des Komforts
Zustandsobjekte werden vom Automaten selbstständig erzeugt und z.B. nur über selbstgewählte Namen angesprochen.
© MicroConsult - Microelectronics Consulting & Training GmbH
14.12.2015
F 53
MICRO CONSULT

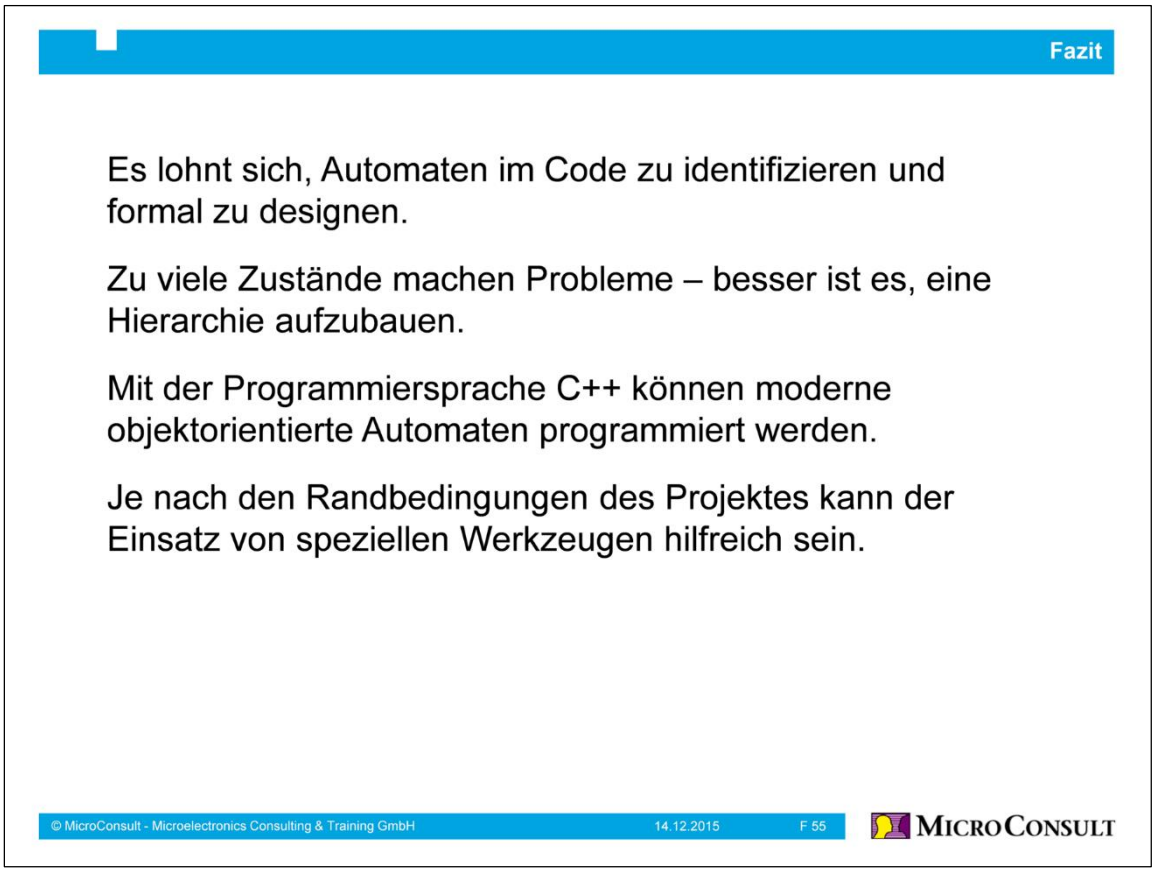
Programmierung endlicher Automaten – Ausblick

Alternativen:

- Nutzung der Boost-Bibliothek. Dort werden zwei verschiedene Automatenimplementierungen angeboten.
- Generierung der Automaten aus Modellierungstools (z.B. UML-Tool) heraus

 14.12.2015 F 54 MICRO CONSULT

5 Fazit


Fazit
Es lohnt sich, Automaten im Code zu identifizieren und formal zu designen.
Zu viele Zustände machen Probleme – besser ist es, eine Hierarchie aufzubauen.
Mit der Programmiersprache C++ können moderne objektorientierte Automaten programmiert werden.
Je nach den Randbedingungen des Projektes kann der Einsatz von speziellen Werkzeugen hilfreich sein.
© MicroConsult - Microelectronics Consulting & Training GmbH
14.12.2015
F 55
MICROCONSULT

6 Download-Link