

# Robotik I: Einführung in die Robotik

## Roboterprogrammierung

Tamim Asfour

KIT-Fakultät für Informatik, Institut für Anthropomatik und Robotik (IAR)  
Hochperformante Humanoide Technologien (H<sup>2</sup>T)



# Inhalt

- **Motivation**
- Klassische Roboterprogrammierverfahren (Übersicht)
- Graphisches Programmierverfahren: Statecharts
- Symbolische Planung

# Motivation - Neue Anforderungen in der Produktion

- Klein- & Kleinstserienfertigung
- Unikatfertigung (z.B. Prototyp)
- Produkte mit:
  - vielen Ausstattungsvarianten
  - hoher Rekonfigurierbarkeit



Flexible Fertigung



# Motivation - Neue Anforderungen im Servicebereich

- Handel:
  - Kommissionierung und Palettierung von Waren
  - Bestücken von Regalen
  
- Qualitätssicherung
  
- Pflege:
  - Unterstützung von Rehabilitationsmaßnahmen
  
- Handwerk:
  - Handhabungen in Schreinereien und Schlossereien



## Motivation - Anforderungen an die humanoide Robotik

- Manipulation beliebiger Objekte
- Selbstständiges Lösen komplexer Aufgaben
- Einsatz im menschlichen Umfeld

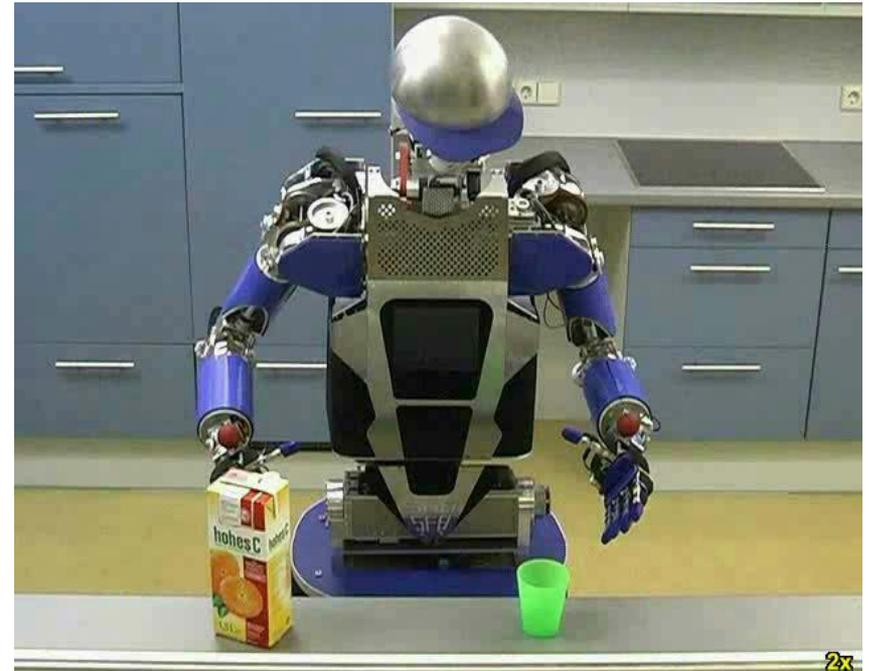
Komplexe Umgebung!

&

Viele Bewegungsfreiheitsgrade!



Programmierung?

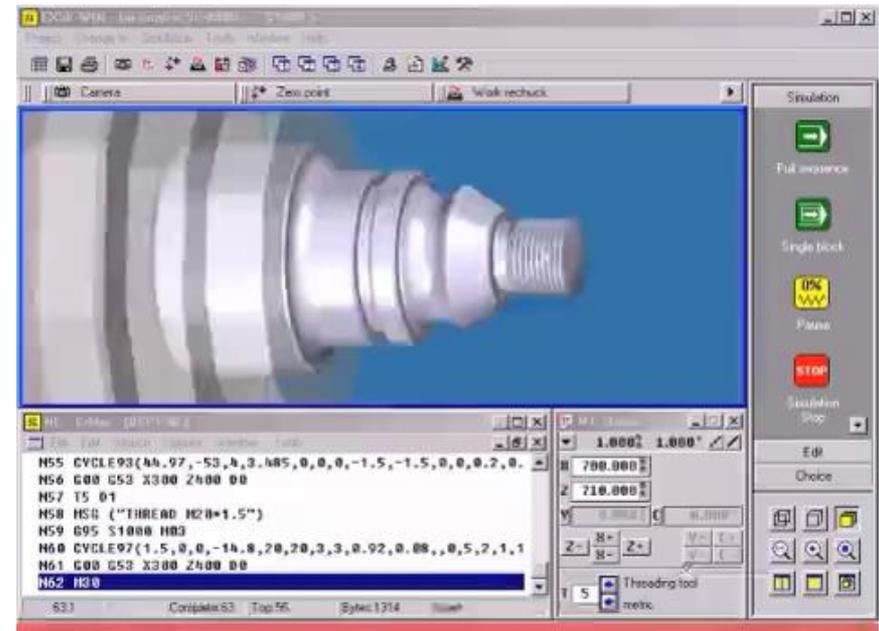


# Motivation

**Klassische Roboterprogrammierung** erfordert Expertenkenntnisse und ist mit hohem Aufwand verbunden



Teach Panel

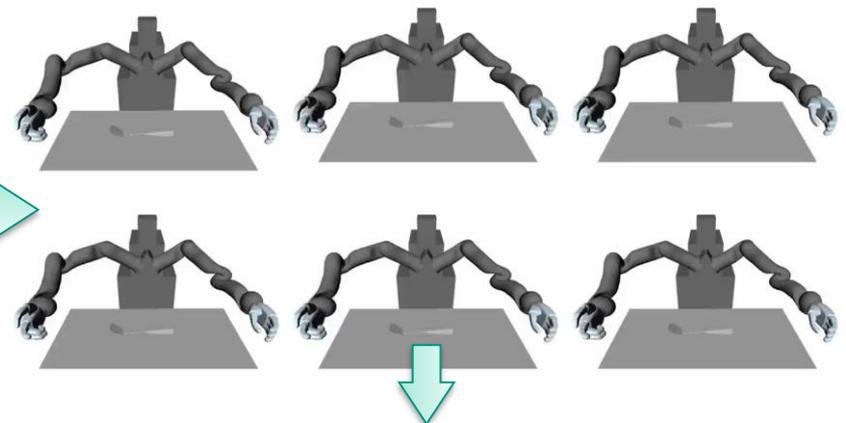


Textuelle Programmierung

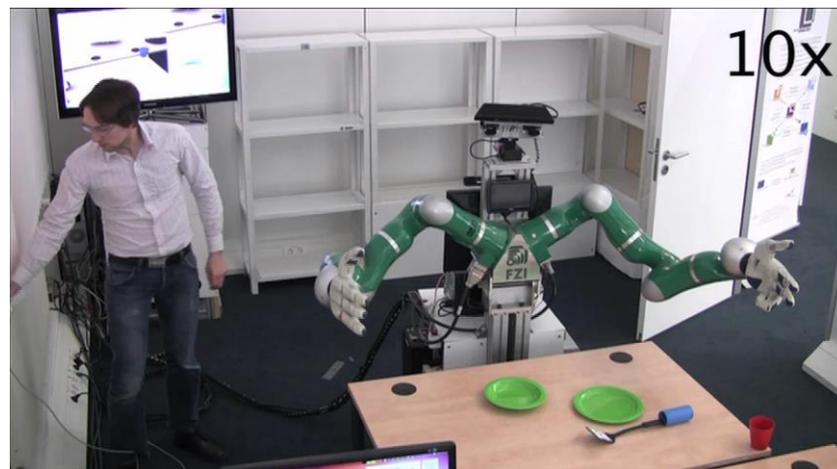
# Interaktive Programmierung



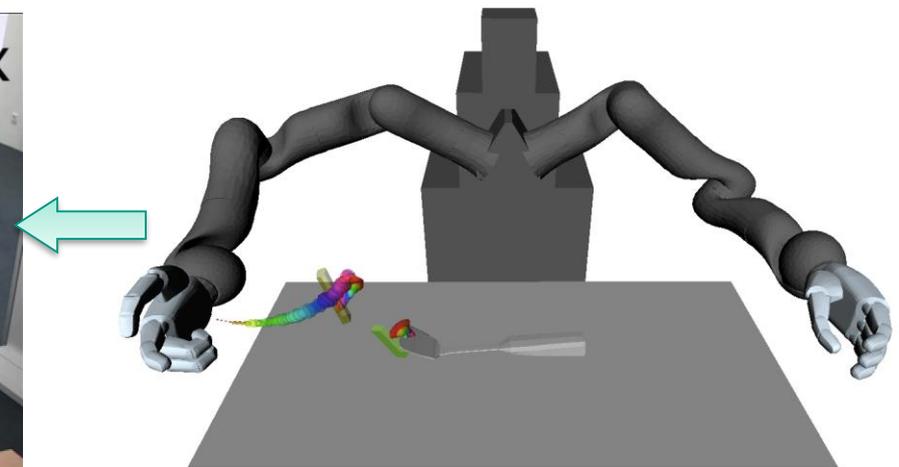
Demonstration & Aufzeichnung



Segmentierung & Interpretation



Ausführung



Abstraktion & Simulation

Rainer Jäkel - Learning of generalized manipulation strategies in service robotics

# Interaktive Programmierung

## Lernen aus Beobachtung des Menschen



Wächter & Asfour (2015)

## Lernen aus Beobachtung des Menschen



---

### Model-Based Hand-Object Tracking and Dynamic Movement Primitives for Segmentation and Recognition of Manipulation Actions

---

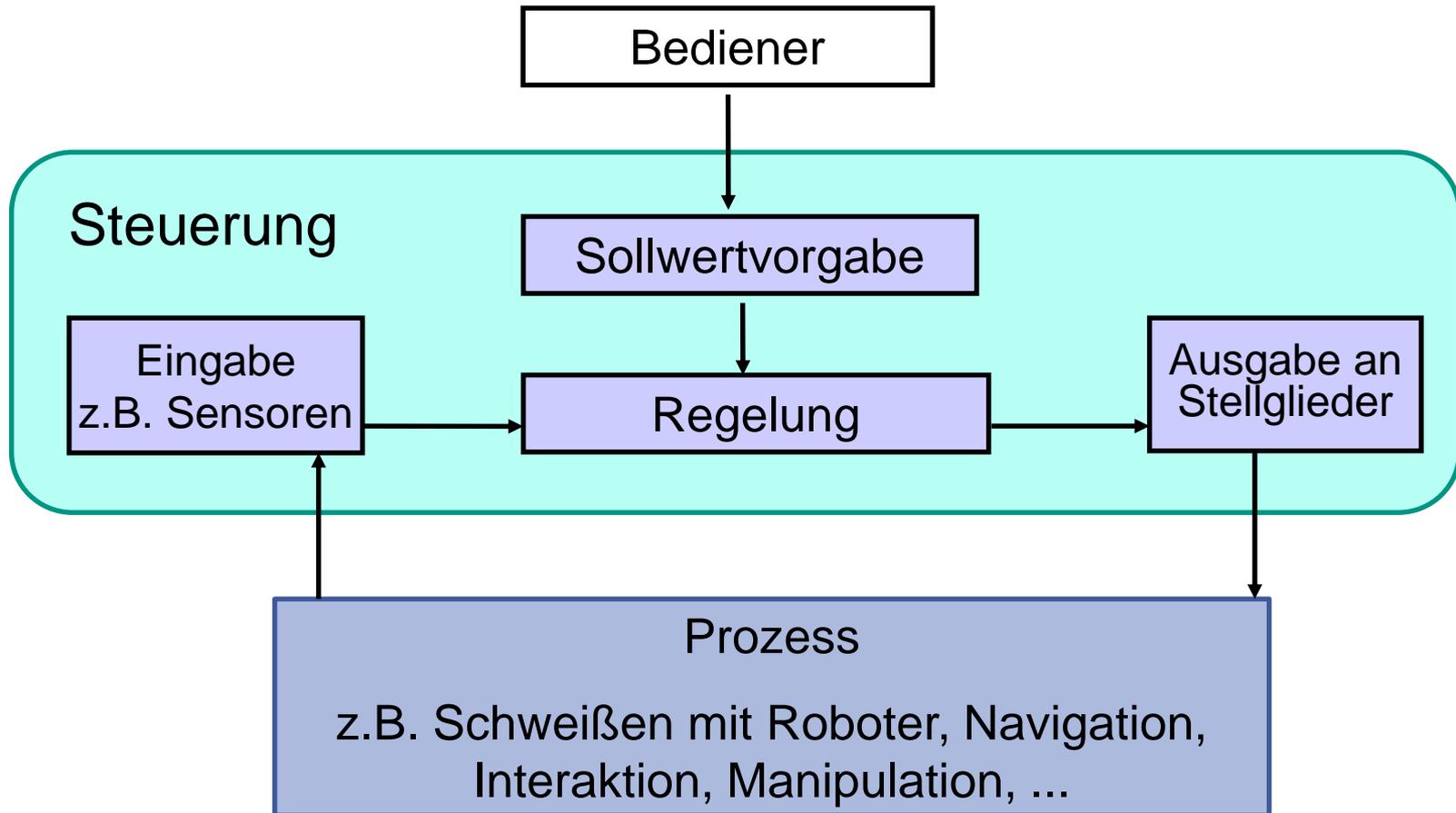
Mirko Wächter, Martin Do, Tamim Asfour



Wächter & Asfour (2015)

# Inhalt

- Motivation
- **Klassische Roboterprogrammierverfahren (Übersicht)**
- Graphisches Programmierverfahren: Statecharts
- Symbolische Planung

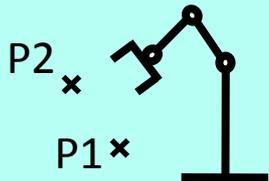


# Roboterprogrammierverfahren

## on-line

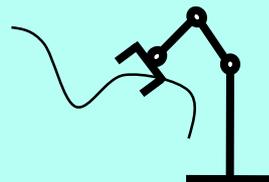
### direkt

#### Teach-In



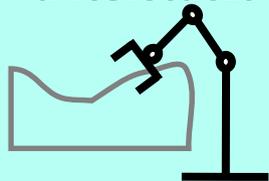
Punkte anfahren  
und speichern

#### Play-Back



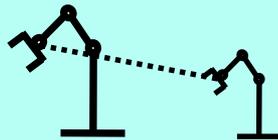
Bahn anfahren  
und speichern

#### Sensor- unterstützt



Werkstückkontur  
erfassen

#### Master-Slave



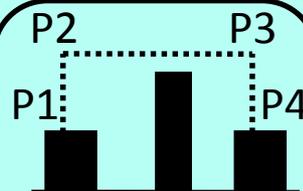
Einsatz  
kinematischer  
Modelle

Hybride  
Verfahren

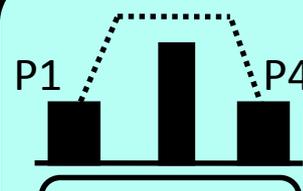
PdV  
Interaktive  
Verfahren

## off-line

### textuell

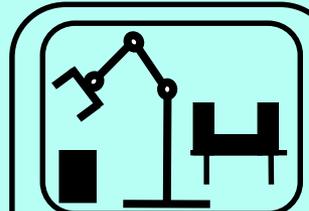


GOTO P2  
GOTO P3  
GOTO P4

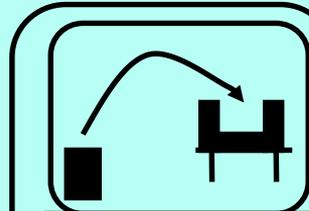


GOTO P4

### graphisch



Bewegungs-  
orientiert



Aufgaben-  
orientiert

# Klassifizierung der Roboterprogrammierverfahren

Kriterien:

## I. Programmierort

- Direkte Programmierung
- Indirekte Programmierung

## II. Abstraktionsgrad der Programmierung

- Implizite Programmierung
- Explizite Programmierung

## III. Art der Programmierung

- Direkte Programmierung
- Textuelle Verfahren
- Graphische Verfahren
- Gemischte Verfahren

# Roboterprogrammierverfahren

## on-line

Die Programmierung erfolgt direkt am Roboter (an der Robotersteuerung).

In der Literatur auch **direkte** oder prozessnahe Programmierung genannt.

## Hybride Verfahren

## off-line

Die Programmierung erfolgt ohne den Roboter mit Hilfe textueller, graphischer, interaktiver Methoden.

In der Literatur auch **indirekte** oder prozessferne Programmierung genannt.

# Klassifizierung der Roboterprogrammierverfahren

Kriterien:

## I. Programmierort

- Direkte Programmierung
- Indirekte Programmierung

## II. Abstraktionsgrad der Programmierung

- **Implizite Programmierung**
- **Explizite Programmierung**

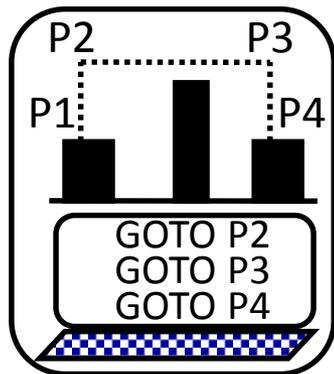
## III. Art der Programmierung

- Direkte Programmierung
- Textuelle Verfahren
- Graphische Verfahren
- Gemischte Verfahren

# Abstraktionsgrad der Programmierung

## Explizite oder roboterorientierte Programmierung (imperative)

Bewegungen und Greiferbefehle sind direkt in eine Programmiersprache eingebunden.

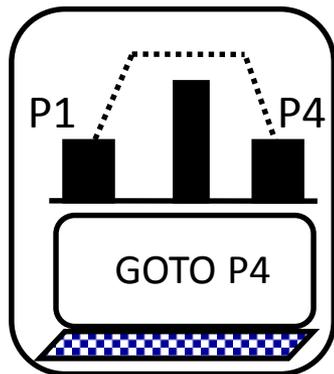


„Wie ist etwas zu tun?“

# Abstraktionsgrad der Programmierung

## Implizite oder aufgabenorientierte Programmierung (deklarativ)

Die Aufgabe, die der Roboter durchführen soll, wird beschrieben, z.B. in Form von Zuständen.



„Was ist zu tun?“

- Abstrakte Form der Programmierung erfolgt in den Phasen
  1. Modellierung der Umwelt
  2. Spezifikation der Aufgaben
  3. Erzeugung der Roboterprogramme
- u. U. erfolgt vor der Ausführung eine Überprüfung des Roboterprogramms (Simulation)

# Klassifizierung der Roboterprogrammierverfahren

Kriterien:

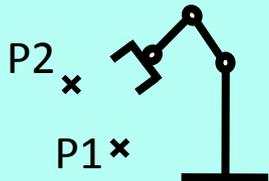
- I. Programmierort
  - Direkte Programmierung
  - Indirekte Programmierung
  
- II. Abstraktionsgrad der Programmierung
  - Implizite Programmierung
  - Explizite Programmierung
  
- III. Art der Programmierung**
  - **Direkte Programmierung**
  - **Textuelle Verfahren**
  - **Graphische Verfahren**
  - **Gemischte Verfahren**

# Direkte Programmierverfahren

on-line

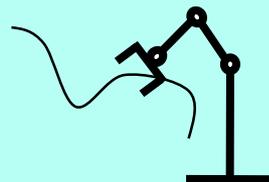
**direkt**

**Teach-In**



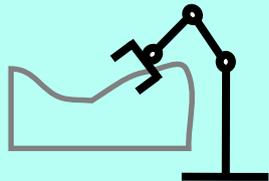
Punkte anfahren  
und speichern

**Play-Back**



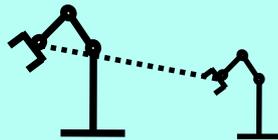
Bahn anfahren  
und speichern

**Sensor-  
unterstützt**



Werkstückkontur  
erfassen

**Master-Slave**



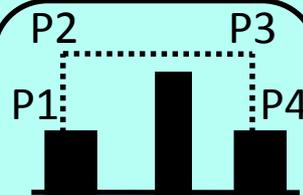
Einsatz  
kinematischer  
Modelle

Hybride  
Verfahren

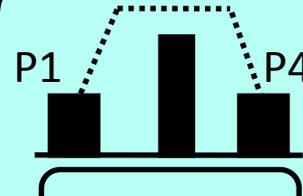
PdV  
Interaktive  
Verfahren

off-line

**textuell**

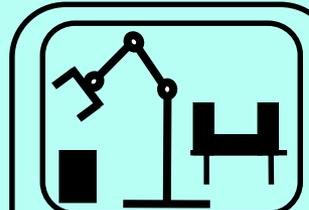


GOTO P2  
GOTO P3  
GOTO P4

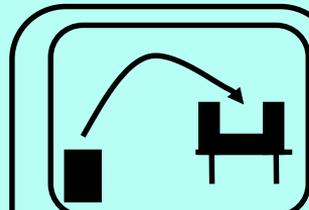


GOTO P4

**graphisch**



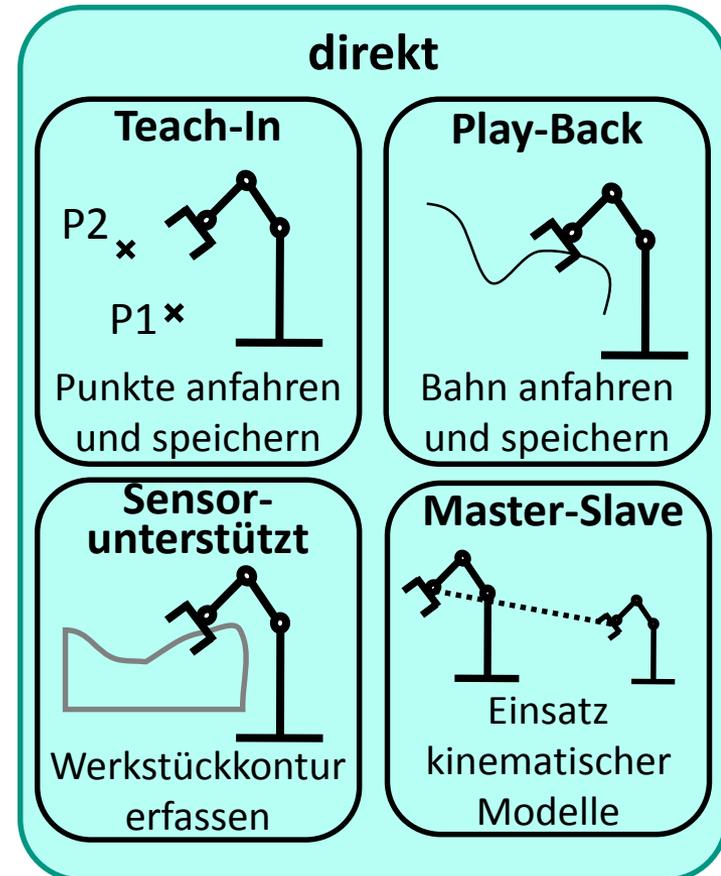
Bewegungs-  
orientiert



Aufgaben-  
orientiert

# Direkte Programmierung

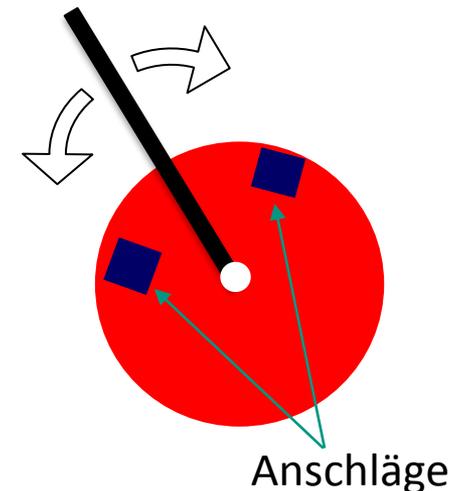
- „Einstellen“ des Roboters
- Teach-In Programmierung
- Play-Back Programmierung
- Master-Slave Programmierung (mit Sonderfall Teleoperation)
- Sensorunterstützte Programmierung



# Direkte Programmierung

## Direktes Einstellen des Roboters

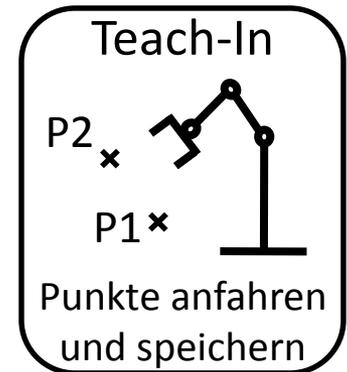
- Ältestes Programmierverfahren
  - Der Bewegungsbereich jedes Gelenks wird durch Stopper eingeschränkt
  - Die Bewegungen erfolgen für jedes Gelenk einzeln bis zum Anschlag
  - Zuordnung zwischen Anfahrpunkten zu Stopper kann mit Codiermatrizen erfolgen
  - Sog.: „Bang-Bang-Robot“
- 
- **Nachteil:**
    - Sehr kleine Menge von Anfahrpunkten



# Direkte Programmierung : Teach-In

## Teach-In Programmierung

- Anfahren markanter Punkte der Bahn mit manueller Steuerung (Teach Box, Teach Panel)
  
- Funktionalität einer Teach Box:
  - Einzelbewegung der Gelenke
  - Bewegung des Effektors in 6 Freiheitsgraden
  - Speichern / Löschen von Anfahrpunkten
  - Eingabe von Geschwindigkeiten
  - Eingabe von Befehlen zur Bedienung des Greifers
  - Starten / Stoppen ganzer Programme



# Teachbox des Mitsubishi RM-501

Programmierung



5 DoF + Greifer  
1,2 kg Nutzlast  
Reichweite 45cm

MOVEMASTER RM-501  
TEACHING BOX

0 0 0 0

INC	DEC	X - 5 B	X + B
PS	PC	Y - 4 S	Y + S
NST	ORG	Z - 3 E	Z + 9 E
TRN	WRT	R - 2	R + 8
MOV	NOR	P - 1	P + 7
ENT	REV	< O > 0	> C < 6

Bewegung:

Basis

Schulter

Ellenbogen

Handgelenk

Handdrehung

Greifer

# Direkte Programmierung: Teach-In

## ■ Weitere Eingabegeräte:

### ■ Maus, Joystick

- schlechte Positioniergenauigkeit
- nur 2 Freiheitsgrade
- Nicht intuitiv bei komplexen Roboterarmen



### ■ SpaceMouse (Teach-Kugel)

- Kugel wird an Kraft-Momenten-Sensor befestigt
- Kräfte werden als Abweichungen in  $x$ ,  $y$  und  $z$  interpretiert
- Momente als Drehung um die Winkel  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$

+ Erfassung von 6 Freiheitsgraden

+ Hohe Positioniergenauigkeit



# Direkte Programmierung: Teach-In

## Vorgehensweise beim Teach-In

- Anfahren markanter Punkte der Bahn
- Bahn = Folge von Zwischenpunkten
- Speichern der Gelenkwerte
- nachträgliche Ergänzung der gespeicherten Werte um Parameter wie Geschwindigkeit, Beschleunigung usw.
- Anwendung:
  - in der Fertigungsindustrie (Punktschweißen, Nieten)
  - Handhabungsaufgaben (Pakete vom Fließband nehmen)

# Direkte Programmierung: Play-Back

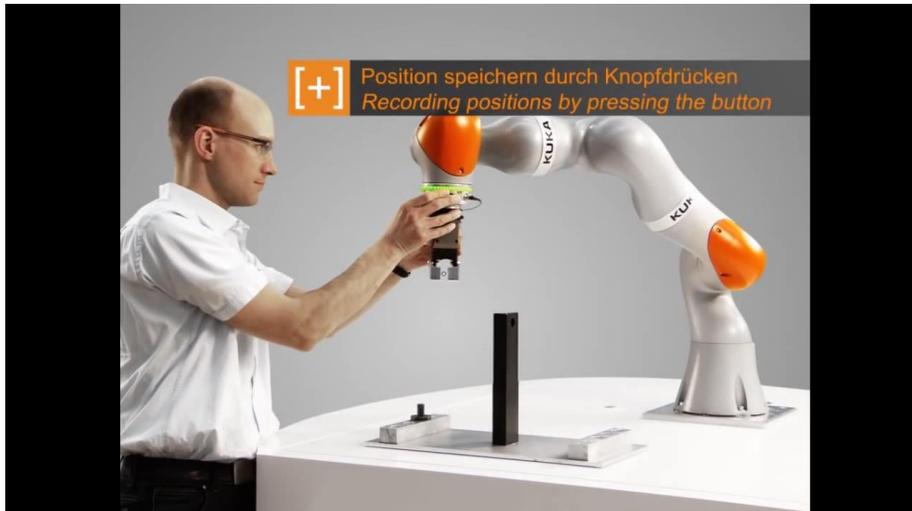
## Play-Back- (manuelle) Programmierung

- Einstellung des Roboters auf Zero-Force-Control (Roboter kann durch den Bediener bewegt werden)
- Auch kinästhetisches Lernen genannt
- Abfahren der gewünschten Bahn
- Speichern der Gelenkwerte:
  - automatisch (definierte Abtastfrequenz) oder
  - manuell (durch Tastendruck)
- Anwendung:
  - mathematisch schwer beschreibbare Bewegungsabläufe
  - Integrierung der handwerklichen Erfahrung des Bedieners
  - Typische Einsatzbereiche sind: Lackieren, Kleben



# Direkte Programmierung: Play-Back

## Play-Back- (manuelle) Programmierung



# Direkte Programmierung: Play-Back

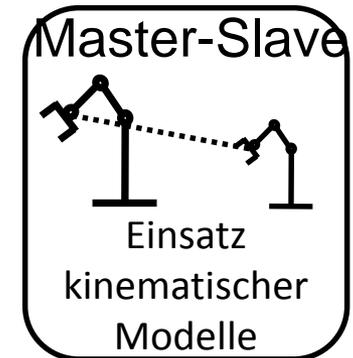
- Nachteile der Play-Back-Programmierung:
  - schwere Roboter schwierig zu bewegen
  - Direkter Kontakt mit Roboter → dadurch Sicherheitsrisiko
  - „hoher Speicherbedarf bei hoher Abtastrate (heute kein Problem mehr)“
  - schlechte Korrekturmöglichkeiten



# Direkte Programmierung: Master-Slave

## Master-Slave-Programmierung:

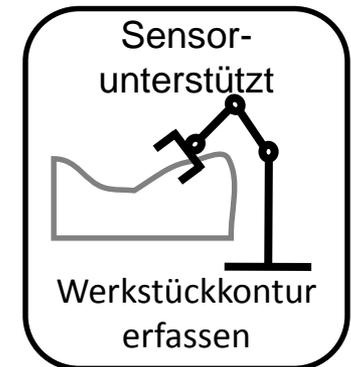
- Bediener führt einen kleinen, leicht bewegbaren Master-Roboter (entspricht einem kinematischen Modell des Slave-Roboters)
- Bewegung wird auf den Slave-Roboter übertragen
- Bewegungen werden synchron ausgeführt
- Slave-Roboter wirkt als Kraftverstärker
- Anwendung:
  - Handhabung großer Lasten bzw. großer Roboter
- Vor- und Nachteile:
  - teuer, da zwei Roboter benötigt werden
  - Möglichkeit, auch schwerste Roboter zu programmieren



# Direkte Programmierung: Sensorunterstützt

## Sensorunterstützte Programmierung

- **Manuell**
  - Bediener führt Programmiergriffel (Leuchtstift, Laserstift) entlang der abzufahrenden Bahn
  - Erfassung der Bewegung durch externe Sensoren (z.B. Kameras, Laserscanner)
  - Berechnung der inversen Kinematik
  - Abspeichern der Bahn als Folge der Gelenkwinkel
- **Automatisch**
  - Vorgabe des Start- und Zielpunktes
  - Sensorische Abtastung der Sollkontur (z.B. über Kraft-Momenten-Sensor)
- **Nachteile:**
  - Fehler bei Erfassung der Bahn; Verdeckung von Teilen der Bahn
  - Kein Einbeziehen der handwerklichen Erfahrung des Bedieners
- **Anwendung:**
  - Schleifen, Entgraten von Werkstücken



# Direkte Programmierung: Zusammenfassung

## ■ Vorteile:

- schnell bei einfachen Trajektorien
- sofort anwendbar
- geringe Fehleranfälligkeit
- Bediener benötigt keine Programmierkenntnisse
- Kein Modell der Umwelt erforderlich

## ■ Nachteile:

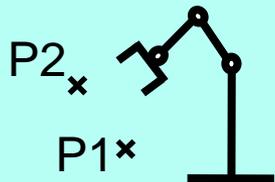
- hoher Aufwand bei komplexen Trajektorien
- nur mit und am Roboter möglich
- Spezifisch für einen Robotertyp
- Verletzungsgefahr durch Roboter
- Keine Adaption an neue Gegebenheiten

# Textuelle Programmierverfahren

## on-line

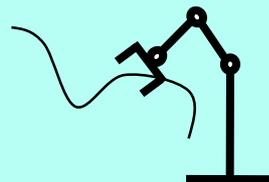
### direkt

#### Teach-In



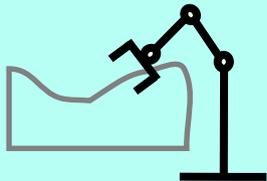
Punkte anfahren  
und speichern

#### Play-Back



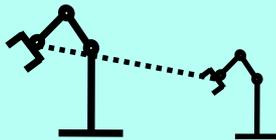
Bahn anfahren  
und speichern

#### Sensor- unterstützt



Werkstückkontur  
erfassen

#### Master-Slave



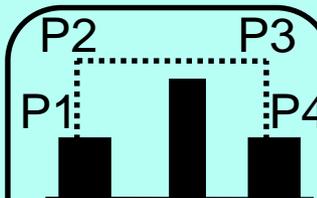
Einsatz  
kinematischer  
Modelle

Hybride  
Verfahren

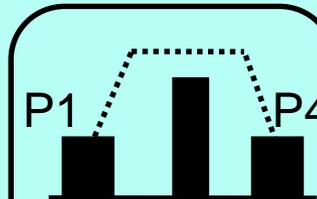
PdV  
Interaktive  
Verfahren

## off-line

### textuell

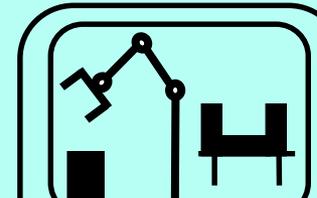


GOTO P2  
GOTO P3  
GOTO P4

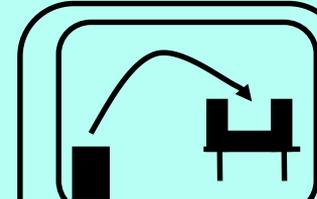


GOTO P4

### graphisch



Bewegungs-  
orientiert



Aufgaben-  
orientiert

# Textuelle Programmierverfahren

- Programmierung erfolgt mittels erweiterter, höherer Programmiersprachen wie PASRO, VAL, V+ (Unimation/Stäubli), RAPID (ABB), KRL (KUKA), ...

## → Robotersteuerprogramm

- Vorteile:
  - Programmierung kann unabhängig vom Roboter erfolgen
  - strukturierte, übersichtliche Programmierlogik
  - Erstellung komplexer Programme  
(Einbezug von Wissensbasis, Weltmodell, Auswertung von Sensoren)
- Nachteile:
  - Bediener benötigt Programmierkenntnisse

# Textuelle Programmierverfahren: DIN 66025

- Befehlskodierung nach **DIN 66025**
- Programm = Menge numerierter Sätze

## Beispiel:

**N70 G00 X20 Z12**

Werkzeug im Eilgang (G00) an Position  $X=20$  und  $Z=12$  bewegen.  
(N = Satznummer)

- Sprachen:
  - APT (Automatically Programmed Tools) 1961 MIT
  - EXAPT (Extended Subset of APT) 1966 TH Aachen

## ■ Beispiel

P1=POINT/20,12

Rapid

GOTO/P1

Variablendefinition

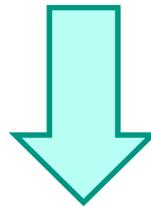
Eilgang

Positionierung auf P1

# Textuelle Programmierverfahren: SPS

## ■ VPS: Verbindungsprogrammierte Steuerung (historisch)

- Steuerung erfolgt über Hardware
- „Programmänderung“ = Hardwareänderung



## ■ SPS: Speicherprogrammierbare Steuerung (englisch: PLC, Programmable Logic Controller)

- Steuerungs- und Regelungsablauf werden programmiert
- große Flexibilität

# Textuelle Programmierverfahren: CNC

## CNC: Computerized Numerical Control

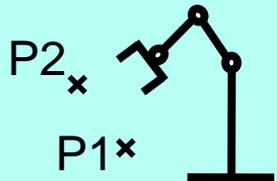
- Steuerung von Werkzeugmaschinen
  - Geometrische Beschreibung des Werkstücks bzw. der Bearbeitungsflächen + Kurven (Bahnkurve des Werkzeugs)
  - Technologische Beschreibung (z.B. Vorschubgeschwindigkeit oder Spindeldrehzahl)
  
- Steuerungsarten:
  - Punktsteuerung (Bohrung)
  - Achsenparallele Steuerung (Fräsen)
  - Bahnsteuerung z.B. Strecke oder Kreis (Brennschneidmaschinen)
  
- Sprachen:
  - APT (Automatically Programmed Tools) 1961 MIT
  - EXAPT (Extended Subset of APT) 1966 TH Aachen

# Hybride Programmierverfahren

## on-line

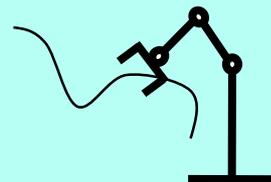
### direkt

#### Teach-In



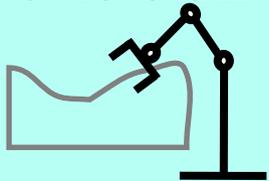
Punkte anfahren  
und speichern

#### Play-Back



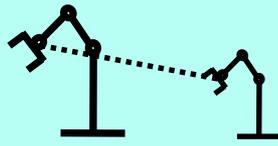
Bahn anfahren  
und speichern

#### Sensor- unterstützt



Werkstückkontur  
erfassen

#### Master-Slave



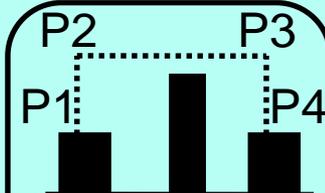
Einsatz  
kinematischer  
Modelle

Hybride  
Verfahren

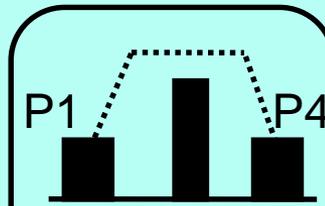
PdV  
Interaktive  
Verfahren

## off-line

### textuell

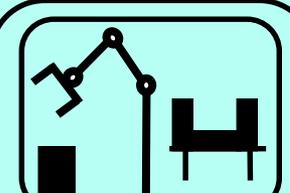


GOTO P2  
GOTO P3  
GOTO P4

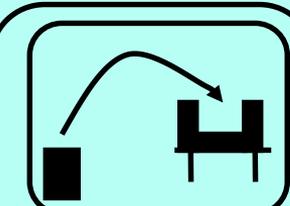


GOTO P4

### graphisch



Bewegungs-  
orientiert



Aufgaben-  
orientiert

# Hybride Verfahren

- Graphische Programmierung basierend auf **sensorieller Erfassung der Benutzervorführung**

→ Simulation der Roboterprogramme

- Vorteile:

- Programmierer benötigt weniger Programmierkenntnisse als bei textueller Programmierung
- Einfache Programmierung, leichte Fehlererkennung
- Schnelles Erstellen komplexer Programme (rapid prototyping)

- Nachteile:

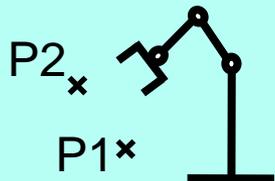
- sensorielle Benutzererfassung noch zu ungenau (wie bei allen online Verfahren)
- Leistungsfähige Hardware für Signalanalyse, Modellierung, ...
- Komplexe Modelle werden benötigt

# Graphische Programmierverfahren

## on-line

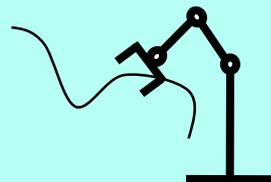
### direkt

#### Teach-In



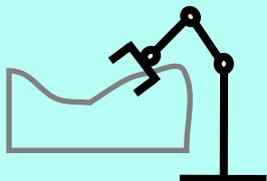
Punkte anfahren  
und speichern

#### Play-Back



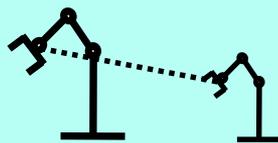
Bahn anfahren  
und speichern

#### Sensor- unterstützt



Werkstückkontur  
erfassen

#### Master-Slave



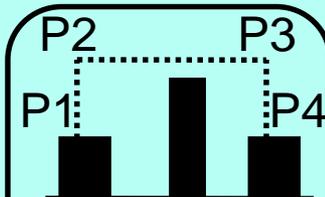
Einsatz  
kinematischer  
Modelle

Hybride  
Verfahren

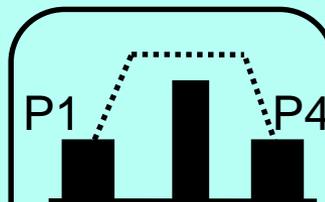
PdV  
Interaktive  
Verfahren

## off-line

### textuell

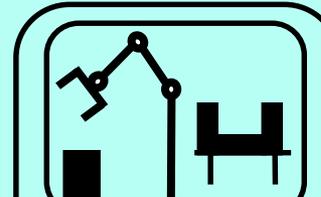


GOTO P2  
GOTO P3  
GOTO P4

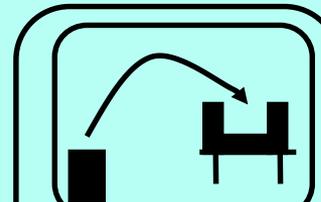


GOTO P4

### graphisch



Bewegungs-  
orientiert



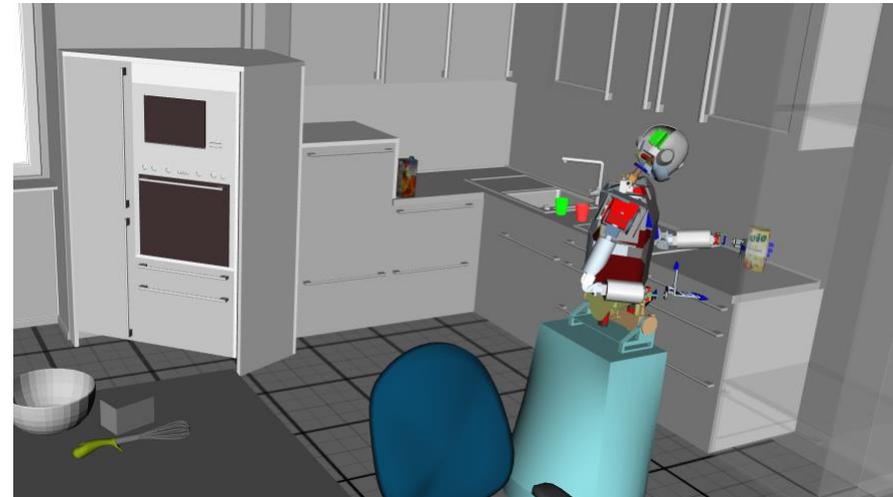
Aufgaben-  
orientiert

# Graphische Roboterprogrammierung

- Zwei grundsätzlich unterschiedliche Varianten

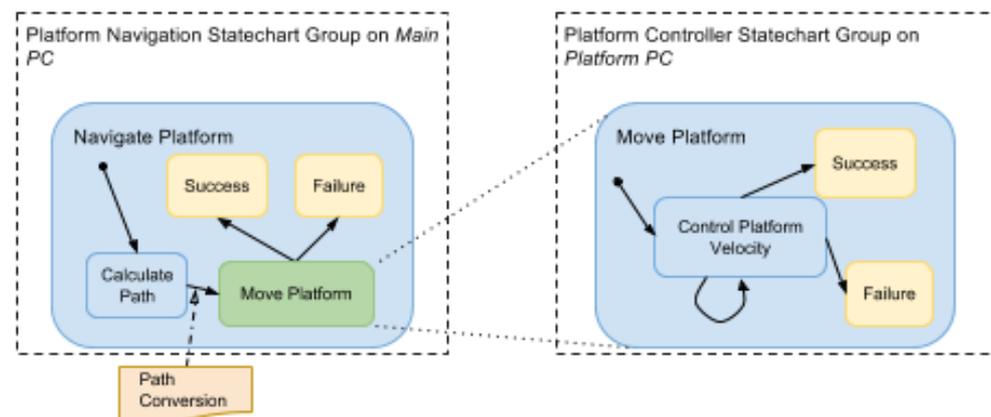
- **Virtuelles Teach-In**

- Manipulation von Roboter und Umgebung in 3D Visualisierung
    - Abspeichern der Bewegungen
    - Benötigt exaktes 3D Modell von Roboter und Umgebung



- **Graphische Modellierungsformalismen**

- Endliche Zustandsautomaten
  - Petri-Netze
  - Statecharts



# Virtuelles Teach-in

## ■ Vorteile:

- Realer Roboter wird für die Programmierung nicht benötigt
- Programmierer benötigt wenige Programmierkenntnisse
- Einfache Programmierung, leichte Fehlererkennung
- Schnelles Erstellen komplexer Programme (rapid prototyping)

## ■ Nachteile :

- Leistungsfähige Hardware für Visualisierung und Simulation
- Komplexe (Rechen-)Modelle für eine realitätsnahe Simulation werden benötigt
- Roboter und Umwelt müssen modelliert werden!

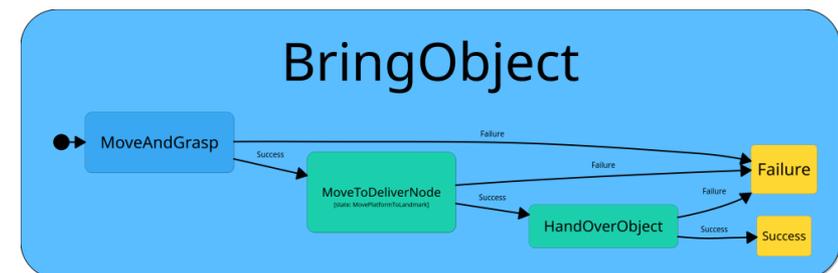
# Inhalt

- Motivation
- Klassische Roboterprogrammierverfahren (Übersicht)
- **Graphisches Programmierverfahren: Statecharts**
- Symbolische Planung

# Roboteraktionsrepräsentation mittels Statecharts

- Warum Statecharts zur Programmierung von Robotern?
- **Lernen** von Aktionen aus Beobachtung ist ein schwieriges Problem (mehr dazu später)
  - Perzeption
  - Embodiment
  - Ausführungsunsicherheiten
- **Textuelle Aktionsprogrammierung** schwierig
  - Systemkomplexität
  - Roboterfähigkeiten stark zustandsbehaftet
  - Fähigkeiten bestehen zumeist aus Subfähigkeiten
  - Textuelle Programmierung unübersichtlich

→ Graphische Programmierung von Roboteraktionen: **Statecharts**



# Graphische Modellierungsformalismen

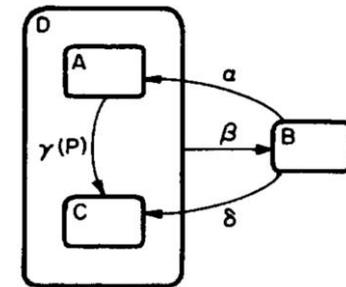
## ■ Harel Statechart Formalismus (Harel, 1987)

### ■ **Graphischer Formalismus** zum Entwurf komplexer Systeme

### ■ Wichtigste Features:

- Hierarchisch
- Interlevel Transitionen
- Orthogonalität
- Zustandsaktionsphasen: Entry, Exit, Throughout

### ■ **Limitation:** Keine Datenflussspezifikation

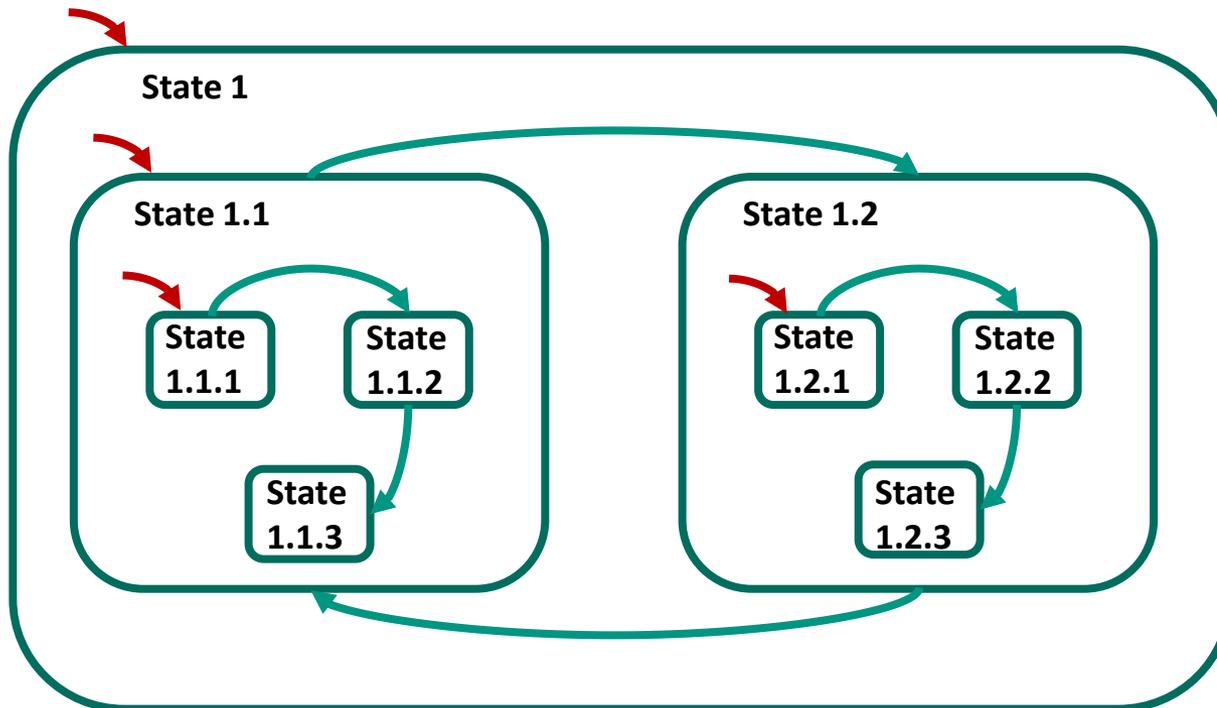


Harel, 1987

- A, B, C und D sind Zustände
- Buchstaben auf den Kanten kennzeichnen Ereignisse; in Klammern werden die Bedingungen angegeben

D. Harel, *Statecharts: A visual formalism for complex systems*, Science of computer programming 8.3, pp. 231-274, 1987

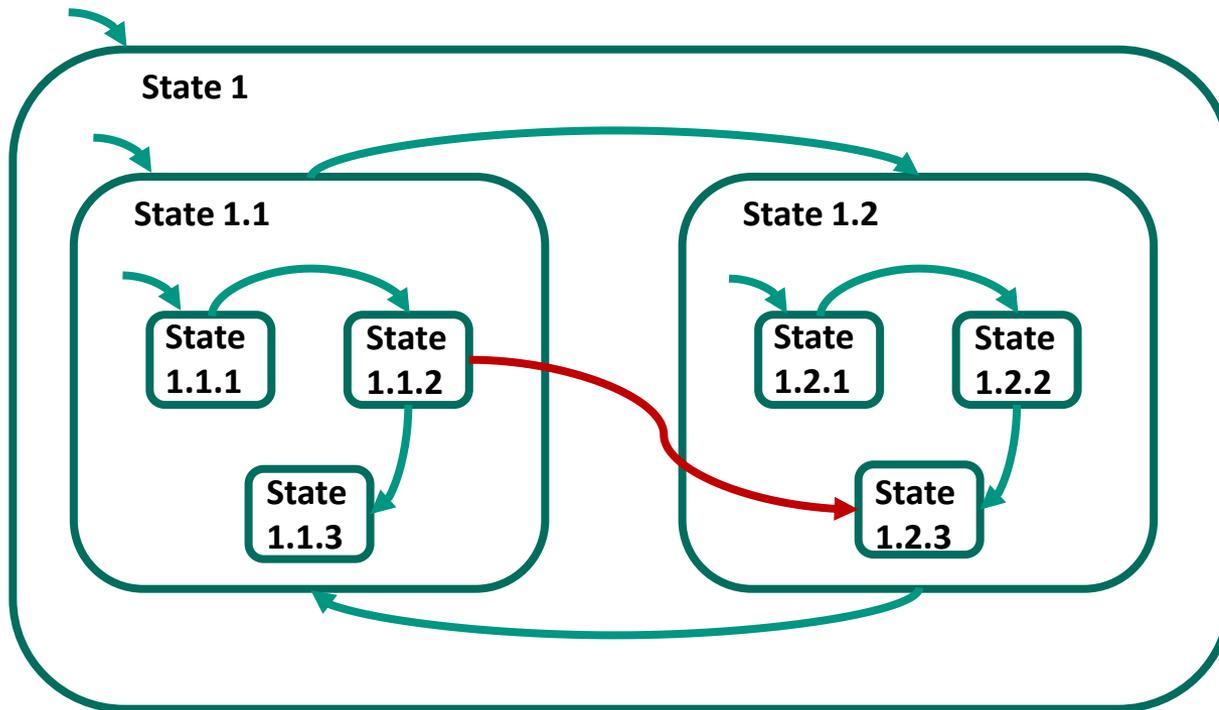
# Statecharts (1)



## Hierarchie

- State 1 ist Top-Level Zustand
- State 1.1 und State 1.2 sind Unterzustände von State 1
- State 1.1 und State 1.2 enthalten weitere Kind-Zustände
- Beim Betreten eines Zustands wird dessen **initialer Kind-Zustand** betreten

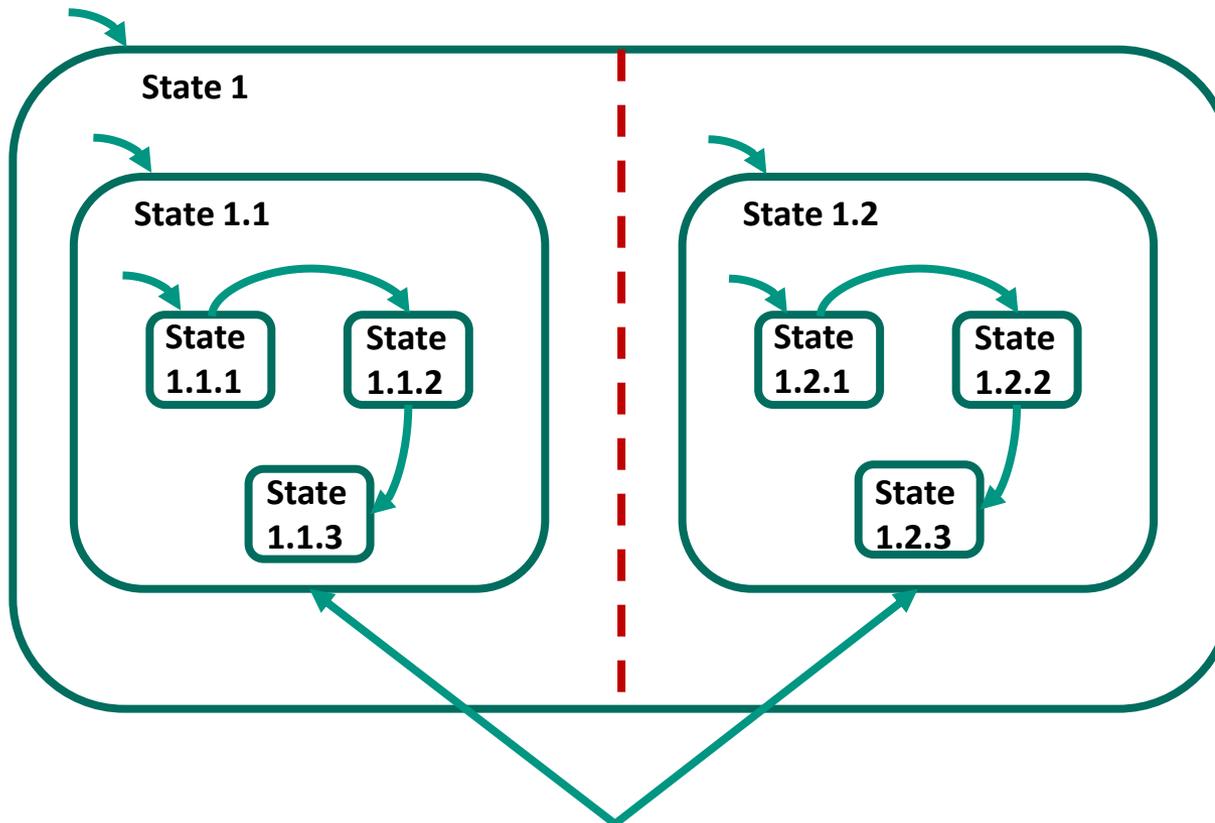
# Statecharts (2)



## Interlevel Transitions

- Transitionen können zwischen Hierarchieebenen stattfinden

# Statecharts (3)

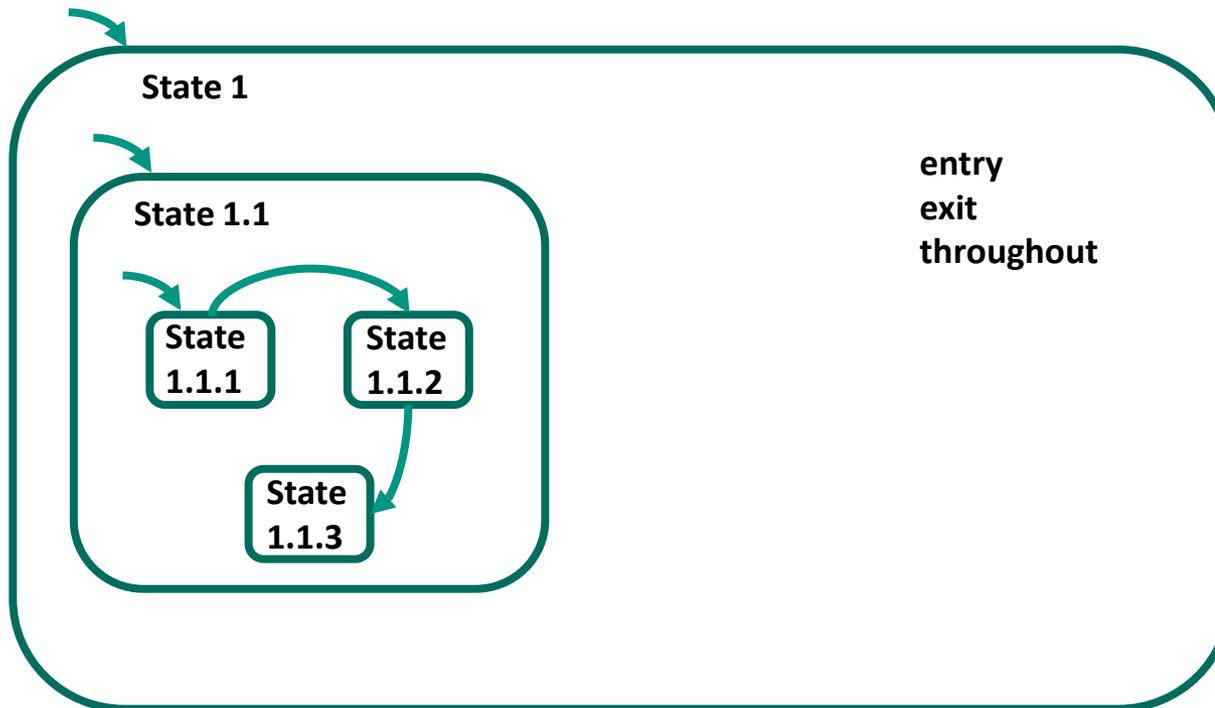


Parallele Ausführung dieser beiden Zustände

## Orthogonalität

- Eine gestrichelte Linie markiert die **parallele Ausführung** der Zustände State 1.1 und State 1.2

# Statecharts (4)

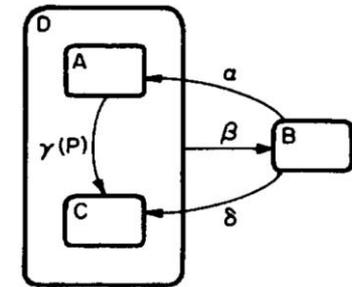


## Zustandsphasen

- Beim **Betreten** von State 1 wird **zuerst** **Aktivität *entry*** ausgeführt, bevor State 1.1 betreten wird
- **Aktivität *throughout*** wird ausgeführt, **während** State 1.1 ausgeführt wird
- Nach Beendigung von State 1.1 und **vor dem Verlassen** von State 1 wird **Aktivität *exit*** ausgeführt

# Erweiterte Statecharts für Roboterprogrammierung

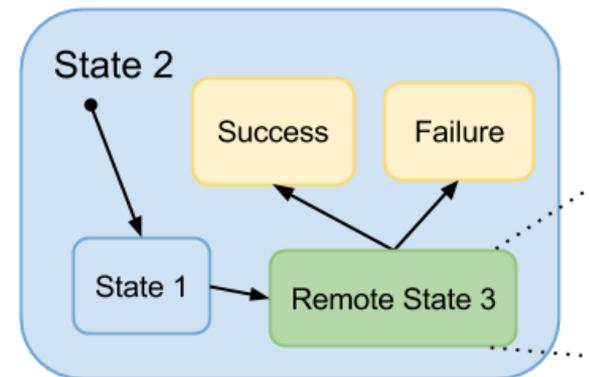
- **Limitation Harel Statechart Formalismus:** Keine Datenflussspezifikation
  - Datenfluss in der Robotik ist notwendig; Ergebnisse von Zuständen werden in Folgezuständen benötigt
    - Beispiel: Objektlokalisierung wird für Visual Servoing oder inverse Kinematik benötigt
  - Wiederverwendbarkeit erfordert eine Adaption von Parametern
    - Kontrollparameter
    - Kinematikparameter
    - Objektparameter
    - ....



Harel, 1987

# Erweiterung des Harel Statechart Formalismus am H<sup>2</sup>T

- ArmarX Statechart Erweiterung: <https://armarx.humanoids.kit.edu/>
- Datenflussspezifikation: Transitionsbasierter Datenfluss
- Keine Inter-level Transitionen, da sie die Wiederverwendbarkeit verhindern
- Erfolgs- und Misserfolgzustände in jedem Zustand
- Dynamische Struktur
- Verteilung über mehrere Host-PCs
- Verbindung von graphischer Kontroll- und Datenflussspezifikation mit C++ Benutzer-Code

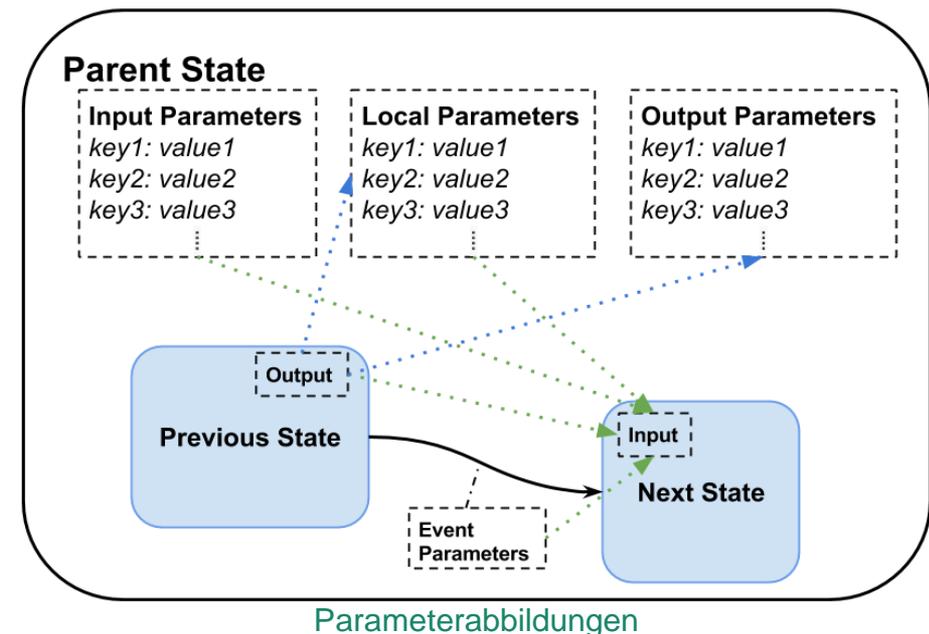


**M. Wächter**, S. Ottenhaus, M. Kröhnert, N. Vahrenkamp and T. Asfour, *The ArmarX Statechart Concept: Graphical Programming of Robot Behaviour*, Frontiers - Software Architectures for Humanoid Robotics, 2016

# Statechart Erweiterungen

## ■ Transitionsbasierter Datenfluss

- Beliebige Datentypen
  - Grundlegende Datentypen: int, float, string, ...
  - Komplexe Datentypen: Position, 6D-Pose, Matrizen, Listen, ...
- 3 Parameter Container pro Zustand
  - Eingabe (Input), Lokale Parameter (Local), Ausgabe (Output)
- Parameterabbildung pro Transition
  - Abbildung von **Quell-Parameter** auf Eingabe-Parameter des **Zielzustandes**
- Spezifizierter Datenfluss
  - Keine Seiteneffekte durch globale Variablen



# Statechart Erweiterungen

## ■ Verteilung über mehrere Host-PCs

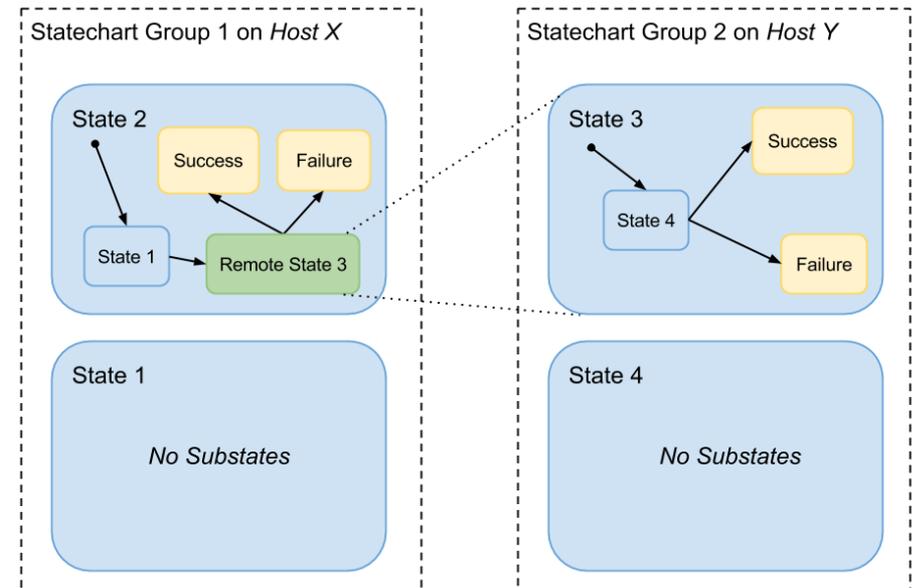
### ■ Transparente Verteilung von Statecharts

- Netzwerk Middleware *ZeroC Ice* (<https://zeroc.com/>)

### ■ Kind-Zustände können Zeiger auf entfernt liegende Zustände sein (grüner Zustand)

### ■ Vorteile:

- Lastverteilung
- Erhöhte Robustheit und Fehlertoleranz
- Näher an eingesetzter Hardware (Sensorik, Aktorik)



Verteilte Statecharts

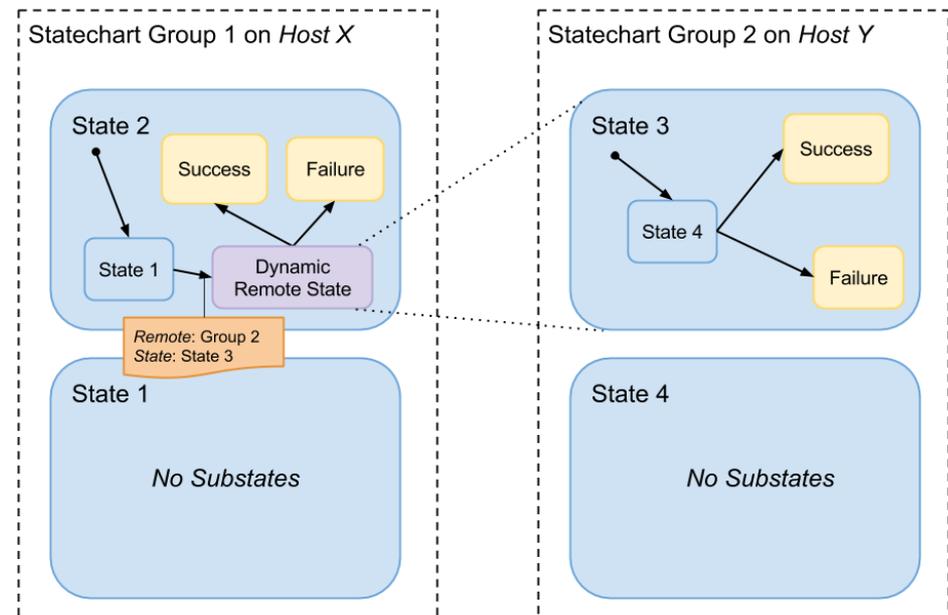
# Statechart Erweiterungen (2)

## ■ Dynamische Struktur

- Austausch von Unterzuständen zur Laufzeit
- Transparente Verbindung zu beliebigem entfernten Zustand
- Unterzustand durch Parameterabbildung spezifiziert
- Einsatz: Ausführung von generierten Plänen

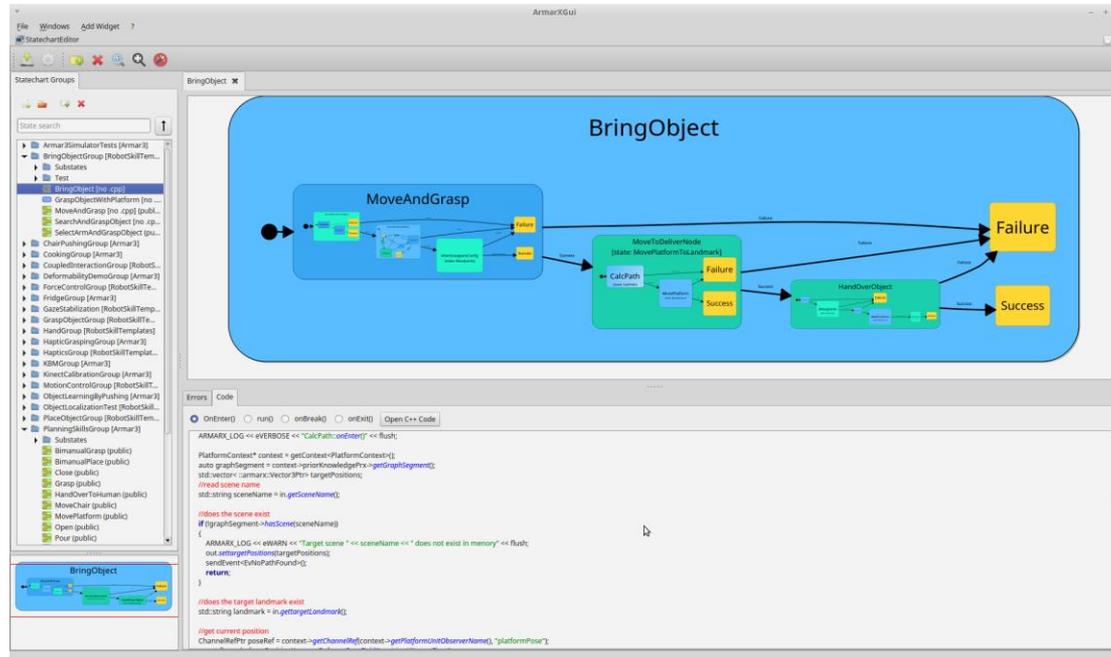
## ■ Vollständig integriert in das Roboter Entwicklungsframework *ArmarX*

- Graphischer Editor
- Verbindung zu allen Roboter-komponenten
- Online Inspektion der aktuellen Ausführung



# Graphischer Statechart Editor in ArmarX

- Tool zur graphischen Spezifikation von
  - Kontrollfluss
  - Datenfluss
  - Abhängigkeiten zu externen Roboterkomponenten
  - Direkt verlinkt mit C++ Code



The screenshot displays the ArmarX GUI's statechart editor. The main window shows a statechart for the 'BringObject' task. The statechart starts with an initial state leading to 'MoveAndGrasp'. From 'MoveAndGrasp', there are transitions to 'CalcPath' (labeled 'Success') and 'Failure'. 'CalcPath' has transitions to 'HandOverObject' (labeled 'Success') and 'Failure'. 'HandOverObject' has transitions to 'Success' and 'Failure'. The 'Failure' state is a final state, and 'Success' is also a final state.

Below the statechart, the C++ code editor shows the implementation of the 'OnEnter' event for the 'CalcPath' state:

```

OnEnter() {
  run() | onBreak() | onExit() | Open C++ Code
  ARMARK_LOG << eVERBOSE << "CalcPath: onEnter" << flush;

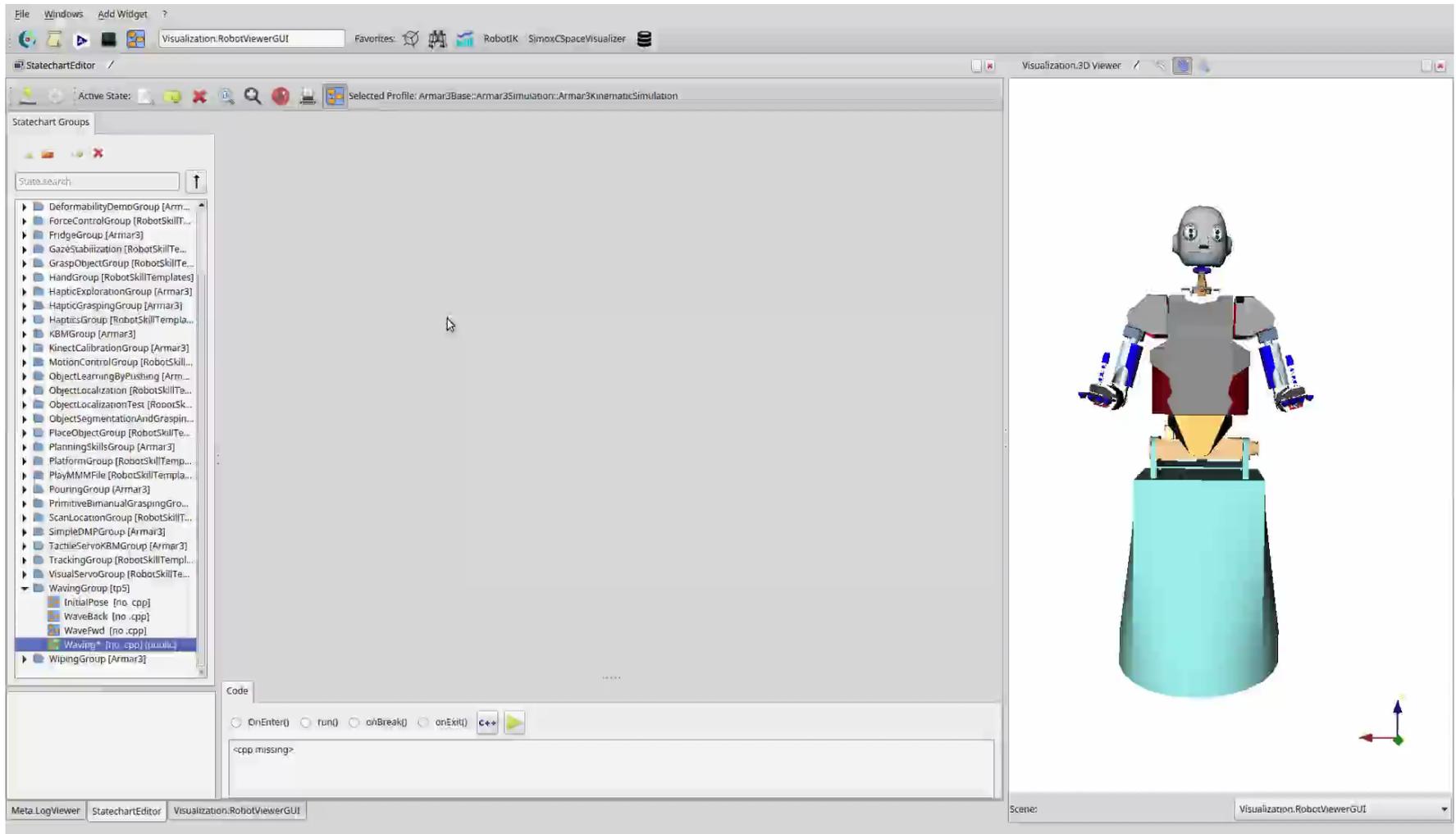
  PlatformContext* context = getContext<PlatformContext>();
  auto graphSegment = context->getKnowledgePtr->getGraphSegment();
  std::vector< armarc::Vector3D> targetPositions;
  //read scene name
  std::string sceneName = in.getSceneName();

  //does the scene exist
  if (graphSegment->hasScene(sceneName))
  {
    ARMARK_LOG << eWARN << "Target scene " << sceneName << " does not exist in memory" << flush;
    context->getKnowledgePtr->getPositions();
    sendEvent(EVNoPathFound-Q);
    return;
  }

  //does the target landmark exist
  std::string landmark = in.getTargetLandmark();

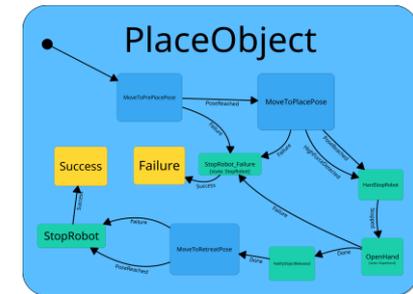
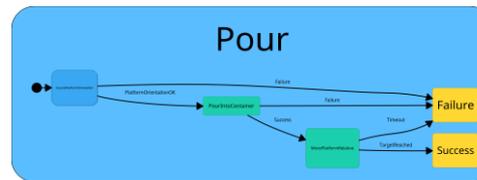
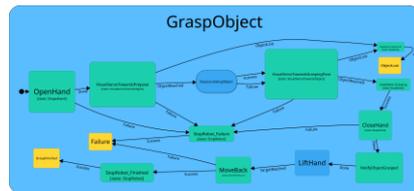
  //get current position
  ChannelRefPtr poseRef = context->getChannelRef(context->getPlatformUseObserverName(), "platformPose");
  
```

# Graphischer Statechart Editor in ArmarX: Demo Video



# Manipulationsfähigkeiten mittels Statecharts

- ARMAR-III: Zur Zeit ~330 Zustände implementiert



# Inhalt

- Motivation
- Klassische Roboterprogrammierverfahren (Übersicht)
- Graphisches Programmierverfahren: Statecharts
- **Symbolische Planung**

# Symbolische Planung - Herkunft

## ■ Wortbedeutung von „Plan“

### ■ Duden: Plan, *Substantiv*

- „*Vorstellung von der Art und Weise, in der ein bestimmtes Ziel verfolgt, ein bestimmtes Vorhaben verwirklicht werden soll*“
- Absicht, Vorhaben
- Entwurf in Form einer Zeichnung oder grafischen Darstellung, in dem festgelegt ist, wie etwas, was geschaffen oder getan werden soll, aussehen, durchgeführt werden soll
- Übersichtskarte

# Symbolische Planung

- Plan in der Robotik:
  - **Sequenz** von **parametrisierten Aktionen** zum Erreichen eines **definierten Ziels**
- Symbolisch:
  - Repräsentation des Weltzustandes durch **Booleschen Prädikaten** statt kontinuierlichen Werten
- Planung:
  - Finden einer Aktionssequenz zur Lösung eines Zielzustandes
- Klassisches Planungsbeispiel: **Blockwelt**

Zustand:  
on(A, table)  
on(B, table)



Ziel: on(A,B)  
Plan: grasp(A)  
stack(A, B)

# Symbolische Planung - Problemstellung

- Herausforderung:
  - Wie kann man das **Planungsproblem** so formulieren, dass
    - eine Lösung **einfach/schnell** zu finden ist?
    - die **Existenz** einer Lösung bewiesen/widerlegt werden kann?
- Klassischer Lösungsansatz:
  - Wissensmodellierung:
    - Beschreibungssprache der Umwelt und Aktionen (STRIPS, ADL, PDDL,...)
  - Suche:
    - Suchalgorithmen zum Finden einer gültigen Aktionssequenz
- Probleme:
  - Suchraum ist sehr groß (Branching factor)
  - Abbildung der realen Welt auf Symbole „**Symbole Grounding Problem**“
- Mehr Details in z.B. „M. Ghallab, D. Nau, and P. Traverso, Automated planning: theory & practice. Elsevier, 2004“

# STRIPS

- „**ST**anford **R**esearch Institute **P**roblem **S**olver“ (Fikes, 1971)
- Bekannteste und eine der ältesten Sprache zur Beschreibung von Planungsdomänen. Wurde in 1971 von Fikes und Nilson zur Steuerung des Roboters „Shakey“ entwickelt
- Sehr einfach, daher auch eingeschränkt
- *Action Description Language* (ADL) und *Planning Domain Definition Language* (PDDL) sind von STRIPS abgeleitet
- Bestandteile von STRIPS (auch Planungsdomäne genannt)
  - Zustände
  - Aktionen
  - Ziele

R. Fikes and N. Nilsson (1971). STRIPS: a new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial Intelligence*, 2:189-208.

# STRIPS: Symbole

- **Funktionsfreie Sprache erster Ordnung (Prädikatenlogik erster Stufe)**
  - Endliche Anzahl an Prädikaten und Konstanten, keine Funktionssymbole
  - Endliche Anzahl an Operatorensymbolen (Aktionen)
- **Beispiel: Blockwelt**
  - **Konstantensymbole:** A, B, C, ... (Namen der Blöcke)
  - **Variablensymbole:**  $u, v, x_1, x_2, \dots$
  - **Prädikate:**
    - *handempty*
    - *ontable(bottle)*
    - *on(bottle, table)*
    - *in (water, cup)*
    - *at(robot, fridge)*
    - ...
  - **Operatorensymbole:** *pickup, putdown, stack, unstack, grasp, move, ...*

# STRIPS: Zustände

## Repräsentation vom Zustand der Welt

- Konjunktion positiver aussagenlogischer Literale aus Prädikaten und Konstantensymbolen

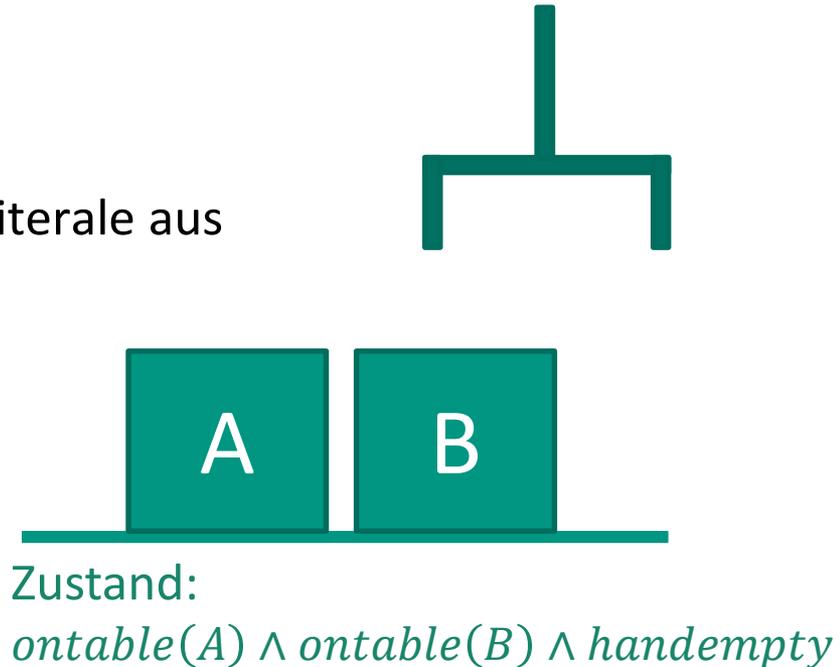
- $A \wedge on(A, B)$

- Einschränkungen:

- Endliche Anzahl an Literalen
  - Keine Variablen:  ~~$on(x, B)$~~
  - Keine negativen Literale:  ~~$on(A, B)$~~
  - Keine Funktionen:  ~~$on(on(B), B)$~~

- Geschlossene Welt (Closed World Assumption)

- Jeder Zustand muss vollständig bekannt sein und beschrieben werden können
  - Nicht vorkommende Literale gelten als negative (negiert) Literale



# STRIPS: Ziele

## Repräsentation von Zielen

- Ein Ziel ist ein teilweise spezifiziert Zustand
  - **Konjunktion** von **positiven** Literalen:  $ontable(B) \wedge handempty$
- Erfüllung von Zielen
  - Alle Literale des Zieles müssen im Weltzustand vorkommen

$$ontable(B) \wedge handempty \wedge on(A, B)$$

erfüllt das Ziel

$$ontable(B) \wedge handempty$$

# STRIPS: Aktionen

## Aktion: Tripel bestehend aus (Deklaration, Vorbedingungen, Effekte)

- Deklaration: Name und Parameterliste
  - Beispiel: `grasp(hand, object, location)`
  - Eindeutiger Name
  - Parameterliste muss alle Variablen enthalten, die in den Vorbedingungen und Effekten benutzt werden
- Vorbedingungen  $V_A$  (Preconditions)
  - Konjunktionen von Literalen, die wahr sein müssen, um einen Operator/Aktion anwenden zu können
    - Negative Literale erlaubt
    - Nur Variablen in Literalen
  - Aktion kann nur angewendet werden, wenn alle Vorbedingungen vollständig erfüllt
- Effekte  $E_A$  (Effects)
  - Auswirkungen der Aktion auf den Weltzustand
  - Liste von positiven oder negativen Literalen; auch bekannt als **Hinzufüge-Listen (add-List)** und **Lösch-Listen (Delete-List)** von positiven Literalen

# STRIPS: Aktionen - Beispiele

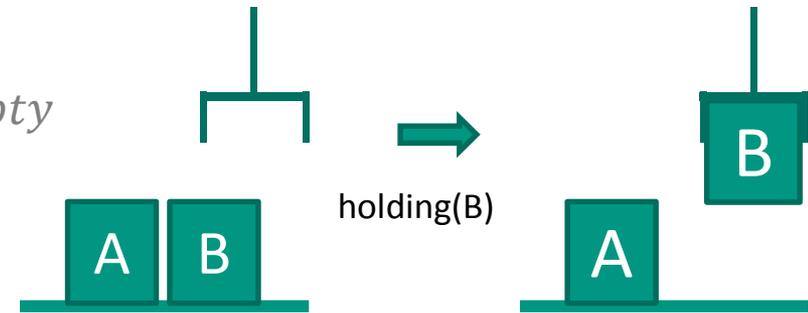
## ■ grasp(object):

■ Vorbedingung:  $clear(object) \wedge handempty$

■ Effekte:

■ Füge hinzu:  $holding(object)$

■ Lösche:  $clear(object) \wedge handempty$



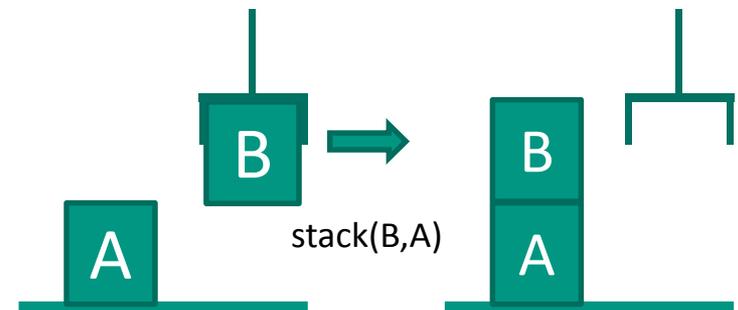
## ■ stack(object1, object2):

■ Vorbedingung:  $clear(object2) \wedge holding(object1)$

■ Effekte:

■ Füge hinzu:  $on(object1, object2) \wedge handempty$

■ Lösche:  $clear(object2) \wedge holding(object1)$



# STRIPS: Ausführbarkeit

- Eine Aktion  $A$  ist ausführbar in allen Zuständen  $z$ , die die Vorbedingung  $V_A$  erfüllen
- **Ergebnis der Ausführung:**
  - Das Ergebnis  $z'$  der Ausführung der Aktion  $A$  auf einem Zustand  $z$  erhält man durch
    - Entfernen aller **negativen** Literale des Effekts  $E_A$  aus  $z$
    - Hinzufügen aller **positiven** Literale des Effekts  $E_A$  zu  $z$

# STRIPS: Vor- und Nachteile

## ■ Vorteile:

- Einfache Beschreibungssprache
- Einfache Planung
- Lösbarkeitsbeweis einfach

## ■ Nachteile:

- Viele Restriktionen beim Modellieren
  - Geschlossene Welt
  - Nur positive Literale in Zuständen (Unbekanntes Wissen nicht modellierbar)
  - Keine **Quantoren** ( $\forall, \exists$ ) und **Disjunktionen** ( $\vee$ ) in Zielen, Vorbedingungen, Effekte
  - Keine Typisierung der Parameter (Nur mit Prädikaten umsetzbar)
  - Nur Boolesche Prädikate

## ■ ADL und PDDL

- sind mächtiger
- erlauben bessere Modellierung
- aber auch komplexer

# STRIPS: Suche im Zustandsraum

- Suche: Anwenden von *ausführbaren* Aktionen
- Suche ist einfach umzusetzen
  - Keine Funktionssymbole
    - Endlicher Zustandsraum
    - Standard-Algorithmen zur Baumsuche möglich
  - Transformation der Vorbedingungen
    - Effekte bijektiv → Suche auch rückwärts möglich
- Problem: Suchraum ist sehr groß
  - Branching factor: Anzahl möglicher Verzweigungen pro Zustand
  - Aktion mit  $n$  Parametern (Aktionsparameter) und  $m$  Konstanten (objects, robot, hand, ...) in der Domäne
    - $m^n$  Aktionskandidaten
    - Prüfung auf Ausführbarkeit → Alle ausführbaren Aktionen werden weiter verfolgt

# Suche im Zustandsraum

## ■ Suchalgorithmen

### ■ Tiefensuche

- Findet meistens nicht den kürzesten Plan (z.B. Roboter fährt unnötig herum)

### ■ Breitensuche

- Findet immer den kürzesten Plan
- Hoher Speicherverbrauch -> Oft nicht anwendbar

### ■ Heuristik basierte Suche

- Güte der Heuristik ist ausschlaggebend
- Keine allgemeingültige Heuristik

### ■ *FastForward*-Planer (Hoffmann et al., 2001)

- Gierige Vorwärtssuche mit Heuristik
- Breitensuche um aus lokalen Minima zu entkommen
- Findet nicht immer den kürzesten Plan, aber in vielen Fällen einen kurzen

### ■ Planungsgraphen

- Analyse der Prädikate und Aktionen um eine Heuristik aufzustellen