

Korrekte Software: Grundlagen und Methoden
Vorlesung 1 vom 03.04.24
Einführung

Serge Autexier, Christoph Lüth

Universität Bremen

Sommersemester 2024

Organisatorisches

▶ Veranstalter:



Serge Autexier
serge.autexier@dfki.de
Cartesium 1.49¹, Tel. 59834



Christoph Lüth
christoph.lueth@dfki.de
MZH 4186, Tel. 59830

▶ Termine:

- ▶ Mittwoch, 10 – 12, MZH 5600
- ▶ Donnerstag, 10 – 12, MZH 5600

▶ **Webseite:** <https://www.informatik.uni-bremen.de/~cxl/lehre/ksgm.ss24>

Veranstaltungskonzept

- ▶ Aus den letzten Jahren: **integrierte Veranstaltung** statt **langer Vorlesung**.
- ▶ Kürzere **Vortragseinheiten**, dazwischen **Arbeitsfragen** (Kurzübungen)
- ▶ Wöchentliche **Übungsaufgaben** zur Vertiefung
- ▶ Technisch:
 - ▶ Fragen/Kurzübungen in **HedgeDoc**: <http://hackmd.informatik.uni-bremen.de/>
 - ▶ Übungsblätter als **Markdown**, Abgabe über gitlab.

Prüfungsform

- ▶ 10 Übungsblätter (geplant)
- ▶ **Bewertung:**
 - ▶ A (sehr gut, 1.3) — nichts zu meckern, keine/kaum Fehler
 - ▶ B (gut, 2.3) — kleine Fehler, sonst gut
 - ▶ C (befriedigend, 3.3) — größere Fehler oder Mängel
 - ▶ Nicht bearbeitet — oder mehr Fehler als Bearbeitung
- ▶ **Prüfungsleistung:**
 - ▶ **Mündliche Prüfung:** Einzelprüfung ca. 20– 30 Minuten
 - ▶ **Übungsbetrieb** (bis zu 15% Bonuspunkte, keine Voraussetzung)

Übungsbetrieb

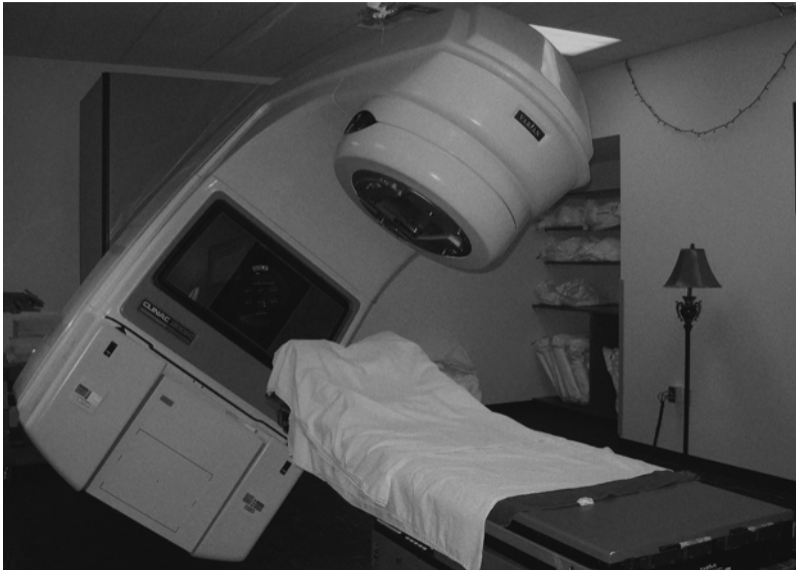
- ▶ Abgabe und Korrektur des Übungsbetriebs erfolgt über **gitlab**.
- ▶ Dazu legt **pro Gruppe** ein Repository an.
- ▶ Ladet uns (clueth, autexier) als Developer ein.
- ▶ Für jedes Übungsblatt:
 - 1 Das Übungsblatt ladet ihr von der Webseite herunter und bearbeitet es **elektronisch**.
 - 2 Die Lösung wird als Markdown abgelegt (bitte Namen uebung-XX.md nicht verändern; Zusatzmaterial als uebung-XX-...wenn nötig), und ladet es **vor** dem Abgabezeitpunkt hoch (push).
 - 3 Nach dem Abgabezeitpunkt laden wir die Änderungen herunter (pull), korrigieren direkt im Markdown, fügen die Bewertung hinzu, und laden die Korrektur wieder hoch (push)

Arbeitsblatt 1.1: Jetzt seid ihr dran!

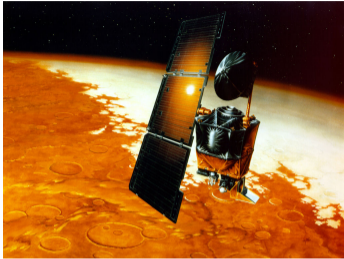
- ▶ Gruppiert euch in Gruppen zu drei Teilnehmenden!
- ▶ Tragt eure Namen in der Übersicht ein
`https://hackmd.informatik.uni-bremen.de/s/iwDedtWRO#`
- ▶ Und kreierte eine eigene Hackmd Arbeitsblatt Seite pro Gruppe und verlinkt sie auf obiger Übersichtsseite.
- ▶ Auf diesem Arbeitsblatt bearbeitet ihr die Arbeitsfragen im Laufe des Kurses.
- ▶ Bitte nur in "eurem" Arbeitsblatt arbeiten
- ▶ Die Arbeitsblätter sind nicht notenrelevant.

I. Warum Korrekte Software?

Software-Disaster I: Therac-25



Software-Disasters II: Space



Software-Disaster III: AT&T (15.01.1990)

```
while (! empty(ring_rcv_buffer)
      && ! empty(side_buffer empty)) {
  initialize pointer to first message buffer;
  get copy of buffer;
  switch (message) {
    case (incoming_message):
      if (sender is out_of_service) {
        if (empty(ring_wrt_buffer)) {
          send "in service" to status map;
        } else {
          break;
        }
        process incoming message, set up pointers;
        break;
      }
  }
  do optional parameter work;
}
```

Software-Disaster IV: Ugeplantes Übergewicht



- ▶ „A software mistake caused a Tui flight to take off heavier than expected as female passengers using the title “Miss” were classified as children [...]“
- ▶ 38 erwachsene Passagiere als Kinder (35kg) statt als Erwachsene (69kg) klassifiziert.

$$38 \cdot (69 \text{ kg} - 35 \text{ kg}) = 1292 \text{ kg}$$

- ▶ Software „was programmed in an unnamed foreign country where the title “Miss” is used for a child and “Ms” for an adult female.“

Quelle: *Guardian*, 09.04.2021.

<https://www.theguardian.com/world/2021/apr/09/tui-plane-serious-incident-every-miss-on-board-child-weight-birmingham-majorca>

Software-Disaster V: Der Horizon-Skandal

- ▶ 1999 wurde für die lokalen Postämter in Großbritannien das System *Horizon* der Firma Fujitsu für Buchhaltung und Lagerhaltung eingeführt.
- ▶ Das System war fehlerhaft, so dass gelegentlich nicht-existente Fehlbestände angezeigt wurden.
- ▶ Das Post Office hat trotzdem die Fehlbeständen von den lokalen Postbeamten (subpostmaster) eingetrieben; einige wurden angeklagt und verurteilt, andere privatinsolvent oder schieden aus.
- ▶ Erste Berichte über die Fehler tauchten 2005 auf, und wurden 2009 in der Presse publik.
- ▶ Erst 2019 nach einer Sammelklage wurden die Fehler amtlich vom High Court festgestellt, und die bis dahin ergangenen Urteile für unrechtmäßig erklärt.

Software-Disaster V: Der Horizon-Skandal

- ▶ 1999 wurde für die lokalen Postämter in Großbritannien das System *Horizon* der Firma Fujitsu für Buchhaltung und Lagerhaltung eingeführt.
- ▶ Das System war fehlerhaft, so dass gelegentlich nicht-existente Fehlbestände angezeigt wurden.
- ▶ Das Post Office hat trotzdem die Fehlbeständen von den lokalen Postbeamten (subpostmaster) eingetrieben; einige wurden angeklagt und verurteilt, andere privatinsolvent oder schieden aus.
- ▶ Erste Berichte über die Fehler tauchten 2005 auf, und wurden 2009 in der Presse publik.
- ▶ Erst 2019 nach einer Sammelklage wurden die Fehler amtlich vom High Court festgestellt, und die bis dahin ergangenen Urteile für unrechtmäßig erklärt.
- ▶ *Horizon* läuft immer noch, Fujitsu hat einen Vertrag über 2.4 Mrd Pfund.

Quellen: <https://www.bbc.com/news/business-56718036>,

<https://www.theguardian.com/uk-news/2024/feb/02/post-office-scandal-key-takeaways-latest-court-hearings>

Arbeitsblatt 1.2: Jetzt seid ihr dran!

- ▶ Sucht im Netz nach weiteren Software-Disastern:
 - ① Was ist passiert?
 - ② Wie ist es passiert?
 - ③ Was war der Softwarefehler?
- ▶ Quellen: Suchmaschine nach Wahl (“software disasters”), The Risks Digest, <https://catless.ncl.ac.uk/Risks/>

II. Inhalt der Vorlesung

Themen



Korrekte Software im Lehrbuch:

- ▶ Spielzeugsprache
- ▶ Wenig Konstrukte
- ▶ Kleine Beispiele



Korrekte Software im Einsatz:

- ▶ Richtige Programmiersprache
- ▶ Mehr als nur ganze Zahlen
- ▶ Skalierbarkeit — wie können große Programme verifiziert werden?

Inhalt

- ▶ Grundlagen:
 - ▶ Beweis der **Korrektheit** von Programmen: der **Floyd-Hoare-Kalkül**
 - ▶ **Bedeutung** von Programmen: **Semantik**
- ▶ Betrachtete Programmiersprache: “C0” (erweiterte Untermenge von C)
- ▶ Erweiterung der Programmkonstrukte und des Hoare-Kalküls:
 - 1 Referenzen (Zeiger)
 - 2 Funktion und Prozeduren (Modularität)
 - 3 Reiche **Datenstrukturen** (Felder, struct)

Fahrplan

- ▶ Einführung
- ▶ Operationale Semantik
- ▶ Denotationale Semantik
- ▶ Äquivalenz der Operationalen und Denotationalen Semantik
- ▶ Der Floyd-Hoare-Kalkül
- ▶ Invarianten im Floyd-Hoare-Kalkül
- ▶ Korrektheit des Floyd-Hoare-Kalküls
- ▶ Strukturierte Datentypen
- ▶ Verifikationsbedingungen
- ▶ Vorwärts mit Floyd und Hoare
- ▶ Funktionen und Prozeduren I
- ▶ Funktionen und Prozeduren II
- ▶ Referenzen und Speichermodelle
- ▶ Ausblick und Rückblick

III. Warum Semantik?

Idee

- ▶ Was wird hier berechnet?

```
p= 1;  
c= 1;  
while (c <= n) {  
    p = p * c;  
    c = c + 1;  
}
```

Idee

- ▶ Was wird hier berechnet? $p = n!$
- ▶ Warum? Wie können wir das **beweisen**?

```
p= 1;  
c= 1;  
while (c <= n) {  
    p = p * c;  
    c = c + 1;  
}
```

Idee

- ▶ Was wird hier berechnet? $p = n!$
- ▶ Warum? Wie können wir das **beweisen**?
- ▶ Wir berechnen symbolisch, welche Werte Variablen über den Programmverlauf annehmen.

```
p= 1;  
c= 1;  
while (c <= n) {  
    p = p * c;  
    c = c + 1;  
}
```

Semantik von Programmiersprachen

Drei wesentliche Möglichkeiten:

- ▶ **Operationale Semantik:** Ausführung auf einer **abstrakten** Maschine
- ▶ **Denotationale Semantik:** Abbildung in ein **mathematisches Objekt**
- ▶ **Axiomatische Semantik:** Beschreibung anhand der **Eigenschaften**

Arbeitsblatt 1.3: Maschinen und Funktionen

Was genau kann man sich unter “abstrakten Maschine” vorstellen?

Betrachtet als Beispiele:

- ▶ Eine Taschenlampe
- ▶ Eine Waschmaschine
- ▶ Einen Taschenrechner

Was ist hier die Abstraktion?

Unsere Sprache C0

- ▶ C0 ist eine **Untermenge** der Sprache C
- ▶ C0-Programme sind **ausführbare** C-Programme
- ▶ Grundausbaustufe:
 - ▶ Zuweisungen, Fallunterscheidungen, Schleifen
 - ▶ Datentypen: ganze Zahlen mit Arithmetik
 - ▶ Relationen: Vergleich ($=$, \leq)
 - ▶ Boolesche Operatoren: Konjunktion, Disjunktion, Negation
- ▶ 1. Ausbaustufe: Felder und Strukturen
- ▶ 2. Ausbaustufe: Fehler und Ausnahmen
- ▶ 3. Ausbaustufe: Funktionen und Prozeduren (nur Ausblick)
- ▶ 4. Ausbaustufe: Referenzen (nur Ausblick)
- ▶ Fehlt: **union**, **goto**, ...

Operationale Semantik

- ▶ Kernkonzept: Zustandsübergänge einer abstrakten Maschine
- ▶ Abstrakte Maschine hat **impliziten Zustand**
- ▶ Zustand ordnet **Adressen** veränderliche **Werte** zu
- ▶ Konkretes Beispiel: $n \mapsto 3$, p und c undefiniert

```
p = 1;  
c = 1;  
while (c <= n) {  
  p = p * c;  
  c = c + 1; }  
}
```

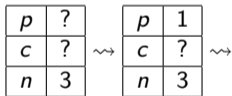
p	?
c	?
n	3

↔

Operationale Semantik

- ▶ Kernkonzept: Zustandsübergänge einer abstrakten Maschine
- ▶ Abstrakte Maschine hat **impliziten Zustand**
- ▶ Zustand ordnet **Adressen** veränderliche **Werte** zu
- ▶ Konkretes Beispiel: $n \mapsto 3$, p und c undefiniert

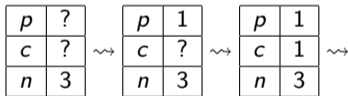
```
p = 1;  
c = 1;  
while (c <= n) {  
    p = p * c;  
    c = c + 1; }  
}
```



Operationale Semantik

- ▶ Kernkonzept: Zustandsübergänge einer abstrakten Maschine
- ▶ Abstrakte Maschine hat **impliziten Zustand**
- ▶ Zustand ordnet **Adressen** veränderliche **Werte** zu
- ▶ Konkretes Beispiel: $n \mapsto 3$, p und c undefiniert

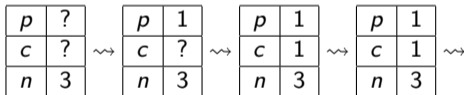
```
p = 1;  
c = 1;  
while (c <= n) {  
    p = p * c;  
    c = c + 1;  
}
```



Operationale Semantik

- ▶ Kernkonzept: Zustandsübergänge einer abstrakten Maschine
- ▶ Abstrakte Maschine hat **impliziten Zustand**
- ▶ Zustand ordnet **Adressen** veränderliche **Werte** zu
- ▶ Konkretes Beispiel: $n \mapsto 3$, p und c undefiniert

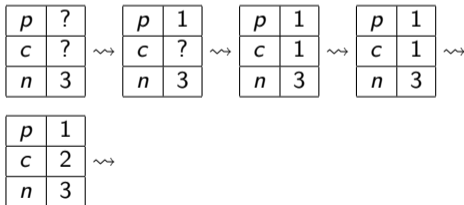
```
p = 1;  
c = 1;  
while (c <= n) {  
  p = p * c;  
  c = c + 1;  
}
```



Operationale Semantik

- ▶ Kernkonzept: Zustandsübergänge einer abstrakten Maschine
- ▶ Abstrakte Maschine hat **impliziten Zustand**
- ▶ Zustand ordnet **Adressen** veränderliche **Werte** zu
- ▶ Konkretes Beispiel: $n \mapsto 3$, p und c undefiniert

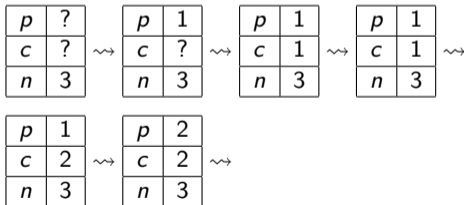
```
p = 1;  
c = 1;  
while (c <= n) {  
    p = p * c;  
    c = c + 1;  
}
```



Operationale Semantik

- ▶ Kernkonzept: Zustandsübergänge einer abstrakten Maschine
- ▶ Abstrakte Maschine hat **impliziten Zustand**
- ▶ Zustand ordnet **Adressen** veränderliche **Werte** zu
- ▶ Konkretes Beispiel: $n \mapsto 3$, p und c undefiniert

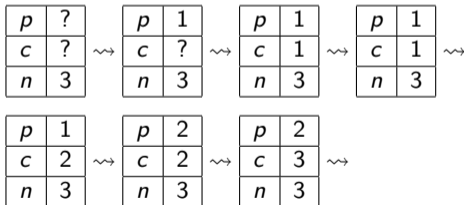
```
p = 1;  
c = 1;  
while (c <= n) {  
  p = p * c;  
  c = c + 1;  
}
```



Operationale Semantik

- ▶ Kernkonzept: Zustandsübergänge einer abstrakten Maschine
- ▶ Abstrakte Maschine hat **impliziten Zustand**
- ▶ Zustand ordnet **Adressen** veränderliche **Werte** zu
- ▶ Konkretes Beispiel: $n \mapsto 3$, p und c undefiniert

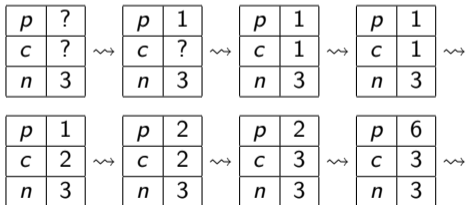
```
p = 1;  
c = 1;  
while (c <= n) {  
    p = p * c;  
    c = c + 1;  
}
```



Operationale Semantik

- ▶ Kernkonzept: Zustandsübergänge einer abstrakten Maschine
- ▶ Abstrakte Maschine hat **impliziten Zustand**
- ▶ Zustand ordnet **Adressen** veränderliche **Werte** zu
- ▶ Konkretes Beispiel: $n \mapsto 3$, p und c undefiniert

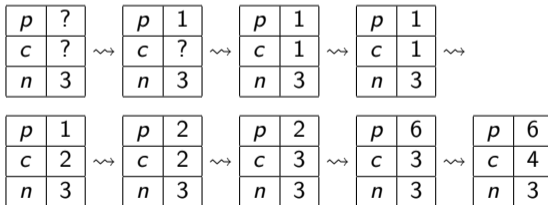
```
p = 1;  
c = 1;  
while (c <= n) {  
    p = p * c;  
    c = c + 1;  
}
```



Operationale Semantik

- ▶ Kernkonzept: Zustandsübergänge einer abstrakten Maschine
- ▶ Abstrakte Maschine hat **impliziten Zustand**
- ▶ Zustand ordnet **Adressen** veränderliche **Werte** zu
- ▶ Konkretes Beispiel: $n \mapsto 3$, p und c undefiniert

```
p = 1;  
c = 1;  
while (c <= n) {  
    p = p * c;  
    c = c + 1;  
}
```



Arbeitsblatt 1.4: Operationale Semantik

Gegeben folgendes C0-Programm:

```
1 x= 0;  
2 while (n > 0) {  
3   x= x+ n*n;  
4   n= n-1;  
5 }
```

Entwickeln Sie die ersten zehn Schritte der operationalen Semantik wie im Beispiel oben für den initialen Zustand

n	4
x	?

$\rightsquigarrow \dots$

Denotationale Semantik

- ▶ Kernkonzept: Abbildung von Programmen auf mathematisches Gegenstück (**Denotat**)
- ▶ **Partielle** Funktionen zwischen Zuständen $\llbracket c \rrbracket : \Sigma \rightarrow \Sigma$
- ▶ Beispiel:

```
p = 1;  
c = 1; // p1  
while (c <= n) {  
    p = p * c;  
    c = c + 1; // p2  
}  
// p3
```

$$\llbracket p_1 \rrbracket(\sigma) = \sigma[p \mapsto 1][c \mapsto 1]$$

$$\llbracket p_2 \rrbracket(\sigma) = \sigma[p \mapsto \sigma(p) * \sigma(c)][c \mapsto \sigma(c) + 1]$$

$$\llbracket p_3 \rrbracket(\sigma) = ???$$

Denotationale Semantik

- ▶ Kernkonzept: Abbildung von Programmen auf mathematisches Gegenstück (**Denotat**)
- ▶ **Partielle** Funktionen zwischen Zuständen $\llbracket c \rrbracket : \Sigma \rightarrow \Sigma$
- ▶ Beispiel:

```
p = 1;  
c = 1; // p1  
while (c <= n) {  
    p = p * c;  
    c = c + 1; // p2  
}  
// p3
```

$$\llbracket p_1 \rrbracket(\sigma) = \sigma[p \mapsto 1][c \mapsto 1]$$

$$\llbracket p_2 \rrbracket(\sigma) = \sigma[p \mapsto \sigma(p) * \sigma(c)][c \mapsto \sigma(c) + 1]$$

$$\llbracket p_3 \rrbracket(\sigma) = ???$$

$$\Gamma(\llbracket c \leq n \rrbracket)(\llbracket p_2 \rrbracket)(\varphi)(\sigma) = \begin{cases} \sigma & \text{if } \llbracket c \leq n \rrbracket(\sigma) = 0 \\ (\varphi \circ \llbracket p_2 \rrbracket)(\sigma) & \text{if } \llbracket c \leq n \rrbracket(\sigma) = 1 \end{cases}$$

Denotationale Semantik

- ▶ Kernkonzept: Abbildung von Programmen auf mathematisches Gegenstück (**Denotat**)
- ▶ **Partielle** Funktionen zwischen Zuständen $\llbracket c \rrbracket : \Sigma \rightarrow \Sigma$
- ▶ Beispiel:

```
p = 1;  
c = 1; // p1  
while (c <= n) {  
  p = p * c;  
  c = c + 1; // p2  
}  
// p3
```

$$\llbracket p_1 \rrbracket(\sigma) = \sigma[p \mapsto 1][c \mapsto 1]$$

$$\llbracket p_2 \rrbracket(\sigma) = \sigma[p \mapsto \sigma(p) * \sigma(c)][c \mapsto \sigma(c) + 1]$$

$$\llbracket p_3 \rrbracket(\sigma) = \text{fix}(\Gamma(\llbracket c \leq n \rrbracket)(\llbracket p_2 \rrbracket))(\llbracket p_1 \rrbracket(\sigma))$$

$$\Gamma(\llbracket c \leq n \rrbracket)(\llbracket p_2 \rrbracket)(\varphi)(\sigma) = \begin{cases} \sigma & \text{if } \llbracket c \leq n \rrbracket(\sigma) = 0 \\ (\varphi \circ \llbracket p_2 \rrbracket)(\sigma) & \text{if } \llbracket c \leq n \rrbracket(\sigma) = 1 \end{cases}$$

$$\Gamma(\beta)(\rho)(\varphi)(\sigma) = \begin{cases} \sigma & \text{if } \beta(\sigma) = 0 \\ (\varphi \circ \rho)(\sigma) & \text{if } \beta(\sigma) = 1 \end{cases}$$

Denotationale Semantik

- ▶ Kernkonzept: Abbildung von Programmen auf mathematisches Gegenstück (**Denotat**)
- ▶ **Partielle** Funktionen zwischen Zuständen $\llbracket c \rrbracket : \Sigma \rightarrow \Sigma$
- ▶ Beispiel:

```
p = 1;  
c = 1; // p1  
while (c <= n) {  
  p = p * c;  
  c = c + 1; // p2  
}  
// p3
```

$$\llbracket p_1 \rrbracket(\sigma) = \sigma[p \mapsto 1][c \mapsto 1]$$

$$\llbracket p_2 \rrbracket(\sigma) = \sigma[p \mapsto \sigma(p) * \sigma(c)][c \mapsto \sigma(c) + 1]$$

$$\llbracket p_3 \rrbracket = \text{fix}(\Gamma(\llbracket c \leq n \rrbracket)(\llbracket p_2 \rrbracket)) \circ \llbracket p_1 \rrbracket$$

$$\Gamma(\llbracket c \leq n \rrbracket)(\llbracket p_2 \rrbracket)(\varphi)(\sigma) = \begin{cases} \sigma & \text{if } \llbracket c \leq n \rrbracket(\sigma) = 0 \\ (\varphi \circ \llbracket p_2 \rrbracket)(\sigma) & \text{if } \llbracket c \leq n \rrbracket(\sigma) = 1 \end{cases}$$

$$\Gamma(\beta)(\rho)(\varphi)(\sigma) = \begin{cases} \sigma & \text{if } \beta(\sigma) = 0 \\ (\varphi \circ \rho)(\sigma) & \text{if } \beta(\sigma) = 1 \end{cases}$$

Axiomatische Semantik

- ▶ Kernkonzept: Charakterisierung von Programmen durch **Zusicherungen**
- ▶ Zusicherungen sind zustandsabhängige Prädikate (Funktionen $\Sigma \rightarrow \mathbb{B}$)
- ▶ Beispiel (mit $n = 3$)

```
// (1)
p = 1; // (2)
c = 1; // (3)
while (c <= n) {
  // (4)
  p = p * c;
  c = c + 1;
  // (5)
}
// (6)
```

- (1) $n = 3$
- (2) $p = 1 \wedge n = 3$
- (3) $p = 1 \wedge c = 1 \wedge n = 3$
- (4) ???
- (5)
- (6) $p = 6 \wedge c = 4 \wedge n = 3$

Axiomatische Semantik

- ▶ Kernkonzept: Charakterisierung von Programmen durch **Zusicherungen**
- ▶ Zusicherungen sind zustandsabhängige Prädikate (Funktionen $\Sigma \rightarrow \mathbb{B}$)
- ▶ Beispiel (mit $n = 3$)

```
// (1)
p = 1; // (2)
c = 1; // (3)
while (c <= n) {
  // (4)
  p = p * c;
  c = c + 1;
  // (5)
}
// (6)
```

- (1) $n = 3$
- (2) $p = 1 \wedge n = 3$
- (3) $p = 1 \wedge c = 1 \wedge n = 3$
- (4) $(p = 1 \wedge c = 1 \vee p = 1 \wedge c = 2 \vee p = 2 \wedge c = 3) \wedge n = 3$
- (5) $(p = 1 \wedge c = 2 \vee p = 2 \wedge c = 3 \vee p = 6 \wedge c = 4) \wedge n = 3$
- (6) $p = 6 \wedge c = 4 \wedge n = 3$

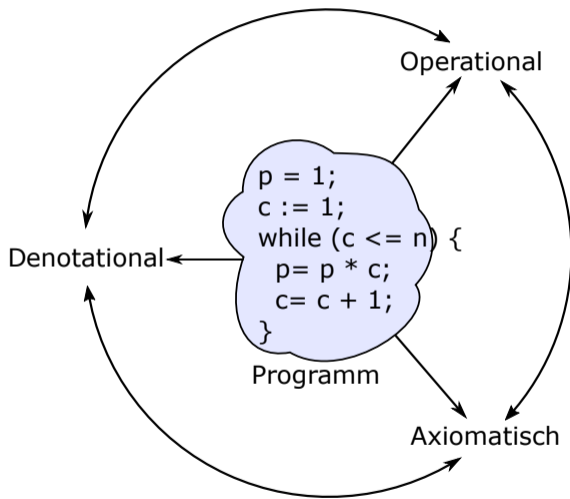
Axiomatische Semantik

- ▶ Kernkonzept: Charakterisierung von Programmen durch **Zusicherungen**
- ▶ Zusicherungen sind zustandsabhängige Prädikate (Funktionen $\Sigma \rightarrow \mathbb{B}$)
- ▶ Beispiel (mit $n = 3$)

```
// (1)
p = 1; // (2)
c = 1; // (3)
while (c <= n) {
  // (4)
  p = p * c;
  c = c + 1;
  // (5)
}
// (6)
```

- (1) $n = 3$
- (2) $p = 1 \wedge n = 3$
- (3) $p = 1 \wedge c = 1 \wedge n = 3$
- (4) $p = (c - 1)! \wedge c \leq n \wedge n = 3$
- (5) $p = (c - 1)! \wedge n = 3$
- (6) $p = 6 \wedge c = 4 \wedge n = 3$

Drei Semantiken — Eine Sicht



IV. Mengen, Relationen, Regeln

Induktive Definitionen mit Regeln

- ▶ Wir nutzen **Regeln**, um induktiv definierte Mengen zu definieren.
 - ▶ Konkret: Relationen wie **Zustandsübergänge**.
- ▶ Regeln bestehen aus Voraussetzungen R_1, \dots, R_n und einer Konklusion S :

$$\frac{R_1 \quad \dots \quad R_n}{S}$$

- ▶ R_i und S sind beliebige Relationen.
- ▶ Idee: (Genau dann) wenn R_1, \dots, R_n wahr sind, dann auch S .

Beispiel Fakultät

- ▶ $\text{fact}(n)$ ist 1, wenn $n \leq 0$
- ▶ $\text{fact}(n)$ ist $n \cdot \text{fact}(n - 1)$, wenn $n > 0$
- ▶ Formalisierung als **Relation**

$$\text{fact}(n, m) \text{ mit } n, m \in \mathbb{N}$$

- ▶ Können wir auch als rekursive Funktion auffassen, wenn rechtseindeutig

Beispiel Fakultät

- ▶ $\text{fact}(n)$ ist 1, wenn $n \leq 0$
- ▶ $\text{fact}(n)$ ist $n \cdot \text{fact}(n - 1)$, wenn $n > 0$
- ▶ Formalisierung als **Relation**

$\text{fact}(n, m)$ mit $n, m \in \mathbb{N}$

- ▶ Können wir auch als rekursive Funktion auffassen, wenn rechtseindeutig

$$\frac{n \leq 0}{\text{fact}(n, 1)}$$

Beispiel Fakultät

- ▶ $\text{fact}(n)$ ist 1, wenn $n \leq 0$
- ▶ $\text{fact}(n)$ ist $n \cdot \text{fact}(n - 1)$, wenn $n > 0$
- ▶ Formalisierung als **Relation**

$\text{fact}(n, m)$ mit $n, m \in \mathbb{N}$

- ▶ Können wir auch als rekursive Funktion auffassen, wenn rechtseindeutig

$$\frac{n \leq 0}{\text{fact}(n, 1)}$$

$$\frac{n > 0 \quad \text{fact}(n - 1, m)}{\text{fact}(n, n \cdot m)}$$

Beispiel Fakultät

- ▶ $\text{fact}(n)$ ist 1, wenn $n \leq 0$
- ▶ $\text{fact}(n)$ ist $n \cdot \text{fact}(n - 1)$, wenn $n > 0$
- ▶ Formalisierung als **Relation**

$\text{fact}(n, m)$ mit $n, m \in \mathbb{N}$

- ▶ Können wir auch als rekursive Funktion auffassen, wenn rechtseindeutig
- ▶ Berechnung von $\text{fact}(4, ?)$

$$\frac{n \leq 0}{\text{fact}(n, 1)}$$

$$\frac{n > 0 \quad \text{fact}(n - 1, m)}{\text{fact}(n, n \cdot m)}$$

Arbeitsblatt 1.5: Beispiel GGT

- ▶ Der ggT von n, m ist m wenn $n = 0$, oder n wenn $m = 0$.
 - ▶ Ansonsten ist der ggT von n, m der ggT des kleineren von n und m und der Differenz der beiden.
- 1 Beschreibt den Algorithmus in Regelschreibweise
 - 2 Berechnet damit $\text{ggT}(24, 18, ?)$

Arbeitsblatt 1.5: Beispiel GGT

- ▶ Der ggT von n, m ist m wenn $n = 0$, oder n wenn $m = 0$.
 - ▶ Ansonsten ist der ggT von n, m der ggT des kleineren von n und m und der Differenz der beiden.
- 1 Beschreibt den Algorithmus in Regelschreibweise
 - 2 Berechnet damit $\text{ggT}(24, 18, ?)$

Formalisierung: $\text{ggT}(n, m, p)$ mit
 $n, m, p \in \mathbb{N}$

$$\overline{\text{ggT}(n, 0, n)}$$

Arbeitsblatt 1.5: Beispiel GGT

- ▶ Der ggT von n, m ist m wenn $n = 0$, oder n wenn $m = 0$.
 - ▶ Ansonsten ist der ggT von n, m der ggT des kleineren von n und m und der Differenz der beiden.
- 1 Beschreibt den Algorithmus in Regelschreibweise
 - 2 Berechnet damit $\text{ggT}(24, 18, ?)$

Formalisierung: $\text{ggT}(n, m, p)$ mit $n, m, p \in \mathbb{N}$

$$\overline{\text{ggT}(n, 0, n)}$$

$$\overline{\text{ggT}(0, m, m)}$$

Arbeitsblatt 1.5: Beispiel GGT

- ▶ Der ggT von n, m ist m wenn $n = 0$, oder n wenn $m = 0$.
 - ▶ Ansonsten ist der ggT von n, m der ggT des kleineren von n und m und der Differenz der beiden.
- 1 Beschreibt den Algorithmus in Regelschreibweise
 - 2 Berechnet damit $\text{ggT}(24, 18, ?)$

Formalisierung: $\text{ggT}(n, m, p)$ mit $n, m, p \in \mathbb{N}$

$$\overline{\text{ggT}(n, 0, n)}$$

$$\overline{\text{ggT}(0, m, m)}$$

$$\frac{n \leq m \quad \text{ggT}(m - n, n, p)}{\text{ggT}(n, m, p)}$$

Arbeitsblatt 1.5: Beispiel GGT

- ▶ Der ggT von n, m ist m wenn $n = 0$, oder n wenn $m = 0$.
 - ▶ Ansonsten ist der ggT von n, m der ggT des kleineren von n und m und der Differenz der beiden.
- 1 Beschreibt den Algorithmus in Regelschreibweise
 - 2 Berechnet damit $\text{ggT}(24, 18, ?)$

Formalisierung: $\text{ggT}(n, m, p)$ mit $n, m, p \in \mathbb{N}$

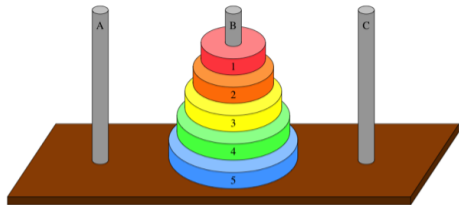
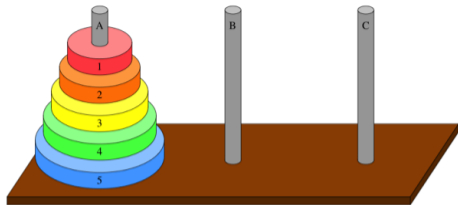
$$\overline{\text{ggT}(n, 0, n)}$$

$$\overline{\text{ggT}(0, m, m)}$$

$$\frac{n \leq m \quad \text{ggT}(m - n, n, p)}{\text{ggT}(n, m, p)}$$

$$\frac{m < n \quad \text{ggT}(n - m, m, p)}{\text{ggT}(n, m, p)}$$

Türme von Hanoi

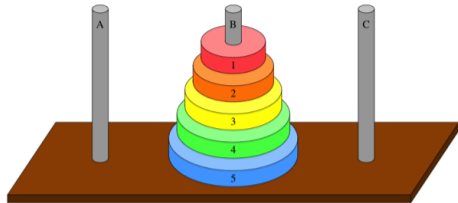
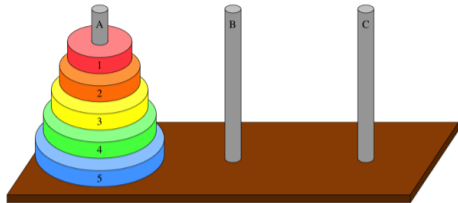


Quelle: <https://www.khanacademy.org/computing/computer-science/algorithms/towers-of-hanoi/a/towers-of-hanoi>

- ▶ Umstapeln zwischen den Stäben
- ▶ Jede Scheibe darf entweder auf einen leeren Stab oder eine größere Scheibe gelegt werden
- ▶ Dies kann repräsentiert werden bei 9 Scheiben, dass
 - ① "ein Stab ist leer" mit der Sequenz $\langle \rangle$ der Länge 0
 - ② "Ein Stab enthält Scheiben n_1, \dots, n_k " durch die Sequenz $\langle n_1, \dots, n_k \rangle$ der Länge k , wobei gelten muss $n_i < n_{i+1}$.

Damit lassen sich Spielzustände repräsentieren als $\langle f_A, f_B, f_C \rangle$ wobei f_A, f_B, f_C die Sequenzen der Nummern der Scheiben auf den entsprechenden Stäben.

Arbeitsblatt 1.6: Türme von Hanoi



- ▶ Seien die Züge beschrieben durch \rightarrow_{AB} als Zug der obersten Scheibe auf A auf den Stapel B. Entsprechend \rightarrow_{BA} , \rightarrow_{AC} , \rightarrow_{CA} , \rightarrow_{BC} , und \rightarrow_{CB} .
- ▶ Beschreibt mittels Regeln die zulässigen Bewegungen zwischen den Stäben:

$$\frac{?}{\langle f_A, f_B, f_C \rangle \rightarrow_{AB} ?}$$

$$\frac{?}{\langle f_A, f_B, f_C \rangle \rightarrow_{BA} ?}$$

$$\frac{?}{\langle f_A, f_B, f_C \rangle \rightarrow_{AC} ?}$$

$$\frac{?}{\langle f_A, f_B, f_C \rangle \rightarrow_{CA} ?}$$

$$\frac{?}{\langle f_A, f_B, f_C \rangle \rightarrow_{BC} ?}$$

$$\frac{?}{\langle f_A, f_B, f_C \rangle \rightarrow_{CB} ?}$$

Zusammenfassung

- ▶ Wir wollen die **Bedeutung** (Semantik) von Programmen beschreiben, um ihre Korrektheit beweisen zu können.
- ▶ Dazu gibt es verschiedene Ansätze, die wir betrachten werden.
- ▶ Nächste Woche geht es mit dem ersten los: **operationale** Semantik