

# Einführung in die Programmierertechnik

## Verifikation

# Vermeidung von Fehlern

- Verwendung geeigneter Werkzeuge
  - Auswahl einer dem Problem angemessenen Programmiersprache
  - Verwendung eines zuverlässigen Compilers
  - Verwendung von Fehlerdiagnosewerkzeugen/-optionen
- *Erst überlegen, dann Programmieren*
  - Planung: Analyse, Design
- Klarer Programmierstil
  - Offensichtliche Korrektheit, leichte Lesbarkeit statt Trickseriei

# Zwischenbehauptungen

- Annahmen über die Belegung von Variablen, während Algorithmus läuft
  - Vorbedingungen (*preconditions*): Welche Forderungen werden an die Eingabe gestellt?
  - Nachbedingungen (*postconditions*): Welche Eigenschaften erfüllt das Ergebnis?
  - Invarianten (*invariants*): Welche Eigenschaften gelten dauerhaft?
- Zwischenbehauptungen (*assertions*): Bedingungen, die an einem bestimmten Punkt der Ausführung erwartet werden
  - geeignet zur Überprüfung von Vor- und Nachbedingungen
  - bedingt geeignet zur Überprüfung von Invarianten: Test muss an “strategischer” Stelle erfolgen
    - etwa: bei jedem Schleifendurchlauf

# Zwischenbehauptungen (2)

- Python: assert-Anweisung
  - `assert_stmt ::= "assert" expression ["," expression]`
- Falls erster *Ausdruck* falsch ist, wird Ausnahme `AssertionError` ausgelöst (falls vorhanden, mit zweitem Ausdruck als Parameter)
  - `assert alter >= 18, "muss volljaehrig sein"`
- `python -O` übergeht alle Tests von Zwischenbehauptungen
  - "Optimierung": Reduzierung der Laufzeit
  - geeignet nach Abschluss der Testphase
- Testen: Ausführung des Programms mit verschiedenen Eingaben
  - Zwischenbehauptungen werden nur für getestete Eingaben überprüft

# Partielle Korrektheit

- Seinen  $P$  und  $Q$  Bedingungen,  $S$  ein Programm:
  - $\{P\} S \{Q\}$  bedeutet: Falls Vorbedingung  $P$  erfüllt ist, ist nach Ablauf von  $S$  Nachbedingung  $Q$  erfüllt
  - Aussage gilt auch, wenn  $S$  nicht terminiert
    - $\{P\} S \{\text{false}\}$  ist gleichbedeutend mit:  $S$  terminiert nicht
- partielle Korrektheitsaussage (PCA, *partial correctness assertion*)
- Ziel: Aufstellung und Beweis von PCAs

# PCAs: Ein Beispiel

{  $N > 0$  }

sum = 0

i = 0

while i < N:

    i = i+1

    sum = sum + i

{ sum = 1 + 2 + ... + N }

- Wenn bei Start des Programms die Konstante  $N > 0$  ist, dann wird nach der Terminierung die Variable sum den Wert  $0 + 1 + 2 + \dots + N$  haben

# Zerlegung durch Zwischenbehauptungen

- Zerlegung eines sequentiellen Programms in zwei Teile; Nachbedingung des ersten Teils ist Vorbedingung des zweiten

```
{ N > 0 }
```

```
sum = 0
```

```
i = 0
```

```
{ N > 0 and sum = 0 and i = 0 }
```

```
{ N > 0 and sum = 0 and i = 0 }
```

```
while i < N:
```

```
    i = i+1
```

```
    sum = sum + i
```

```
{ sum = 1 + 2 + ... + N }
```

# Zerlegung durch Zwischenbehauptungen (2)

- zweiter Schritt: weitere Zerlegung des ersten Teils

$\{ N > 0 \}$

$sum = 0$

$\{ N > 0 \text{ and } sum = 0 \}$

$\{ N > 0 \text{ and } sum = 0 \}$

$i = 0$

$\{ N > 0 \text{ and } sum = 0 \text{ and } i = 0 \}$



# Zerlegung durch Zwischenbehauptungen (3)

- Hintereinanderausführungsregel:

$$\frac{\{P\}S_1\{R\}, \{R\}S_2\{Q\}}{\{P\}S_1; S_2\{Q\}}$$

- Wahl einer geeigneten Zwischenbehauptung ist kritisch:
  - Ist  $R$  zu stark, lässt sich  $\{P\} S_1 \{R\}$  nicht beweisen
  - Ist  $R$  zu schwach, lässt sich  $\{R\} S_2 \{Q\}$  nicht beweisen

# Zuweisungsregel

- Betrachten:  $\{P\} v = t \{Q\}$
- Beispiel: Gilt  $\{y < 2 \cdot (x+1)\} x = x+1 \{x > y-x\}$ ?
  - Nennen  $x'$  neuen Wert von  $x$ , entsprechend  $y'$
  - Gilt also (1)?

$$y < 2(x + 1) \implies x' > y' - x'(1)$$

- $y' = y$  ( $y$  wurde nicht zugewiesen)
- $x' = x+1$
- Einsetzen:  $x+1 > y - (x+1)$

$$y < 2(x + 1) \implies 2(x + 1) > y \implies x + 1 > y - (x + 1)$$

# Zuweisungsregel (2)

- Verallgemeinert:  $Q[v/t]$  ist Aussage  $Q$ , wobei  $v$  durch  $t$  ersetzt wurde

$$\frac{P \implies Q[v/t]}{\{P\}v := t\{Q\}}$$

- Beispiel:  $\{\text{true}\} x = 5 \{x < 10\}$ 
  - weil:  $\text{true} \implies (x < 10)[x/5]$ , also  $\text{true} \implies (5 < 10)$

# Rückwärtsbeweis

- Beispiel: Vertauschen zweier Variablen ohne Hilfsvariable

$$\{x = A \text{ and } y = B\}$$

$$x = x - y$$

$$y = x + y$$

$$x = y - x$$

$$\{x = B \text{ and } y = A\}$$

- Ziel: Finden einer Zwischenbehauptung  $R$ , so dass
  - $\{x = A \text{ and } y = B\}$
  - $x = x - y$
  - $y = x + y$
  - $\{R\}$
- sowie
  - $\{R\}$
  - $x = y - x$
  - $\{x = B \text{ and } y = A\}$
- $R$  möglichst schwach, so dass immernoch
  - $R \Rightarrow \{x = B \text{ and } y=A\}[x/y-x]$ , also
  - $R \Rightarrow \{y-x = B \text{ and } y=A\}$
  - Lösungsansatz:  $R \equiv \{y-x = B \text{ and } y=A\}$

- Gesucht nun Zwischenbehauptung R2, so dass

$$\{x = A \text{ and } y = B\}$$

$$x = x - y$$

$$\{R2\}$$

- sowie

$$\{R2\}$$

$$y = x + y$$

$$\{y-x = B \text{ and } y=A\}$$

- Wieder R2 möglichst schwach:

- $R2 \Rightarrow \{y-x = B \text{ and } y=A\}[y/x+y]$ , also

- $R2 \Rightarrow \{(x+y)-x = B \text{ and } x+y=A\}$

- Lösungsansatz:  $R2 \equiv \{y = B \text{ and } x+y=A\}$

- R2 folgt aus Zuweisungsregel:

- $\{x=A \text{ and } y = B\} \Rightarrow \{y=B \text{ and } x+y=A\}[x/x-y]$

# Rückwärtsbeweis (4)

- Idee: Aufstellen von Zwischenbedingungen von hinten
  - mit jeweils schwächster akzeptabler Vorbedingung
  - *weakest precondition*

# if-then-else-Regel

$$\frac{\{P \wedge B\}S_1\{Q\}, \{P \wedge \neg B\}S_2\{Q\}}{\{P\}if B : S_1 else : S_2\{Q\}}$$

- **Beispiel:**

$\{x = A\}$

if  $x > 0$ :

$z = x$

else:

$z = -x$

$\{z = |A|\}$

- **Zu zeigen:**

- $\{x = A \text{ and } x > 0\} z = x \{z = |A|\}$ , und

- $\{x = A \text{ and not } x > 0\} z = -x \{z = |A|\}$



# Einarmige Alternative und Abschwächungsregel

- if B: S
- Rückführung auf if-then-else-Regel durch *pass*  
if B:  
    S  
else:  
    pass
- Leeraanweisung: Abschwächungsregel  
– abgeleitet aus  $\{P\} x=x \{Q\}$

$$\frac{P \implies Q}{\{P\} \text{ pass } \{Q\}}$$

# Einarmige Alternative

- if-then-Regel

$$\frac{\{P \wedge B\}S\{Q\}, P \wedge \neg B \implies Q}{\{P\}if B : S\{Q\}}$$

- Beispiel:

$\{x = A\}$

if  $x < 0$ :

$x = -x$

$\{x = |A|\}$

# Invarianten und while-Schleifen

- while B: S
- Gesucht: Invarianten von S
  - $\{I\} S \{I\}$
- Für Schleifen stärkere Vorbedingung akzeptabel
- Def: Sei B ein boolescher Ausdruck und S eine Anweisung. I heißt **Invariante bezüglich B**, falls  $\{I \text{ and } B\} S \{I\}$
- Beispiel:  $\text{ggT}(x,y) = N$  Invariante bezüglich  $x \neq y$  von
  - if  $x > y$ :
    - $x = x - y$
  - else:
    - $y = y - x$

# Schleifenregel

$$\frac{\{I \wedge B\} S\{I\}}{\{I\} \text{while } B : S\{I \wedge \neg B\}}$$

- while-Schleifen werden oft mit der Schleifeninvariante *annotiert*

$i = \text{sum} = 0$

$\text{while } i < N: \{ \text{sum} = \sum_{k=0}^i k \}$

$i = i + 1$

$\text{sum} = \text{sum} + i$

# Starke und schwache Invarianten

- Für jede Schleife kann man beliebig viele Invarianten finden
  - beispielsweise {true}, {false}
  - Ist Invariante zu schwach, kann man Korrektheit des Gesamtprogramms nicht beweisen
  - Ist Invariante zu stark, kann man Invariante nicht beweisen
- Strategie:
  1. Aufstellen einer denkbaren Invariante I
  2. Beweis der Voraussetzung der Schleifenregel:  $\{I \text{ and } B\} S \{I\}$
  3. Einsetzen von  $\{ I \}$  als Zwischenbehauptung vor der Schleife
  4. Einsetzen von  $\{ I \text{ and not } B \}$  als Zwischenbehauptung nach der Schleife

# Andere Programmkonstrukte

- Andere Schleifen: Rückführung auf while-Schleife
- Unterprogramme: Annahme von PCAs unabhängig vom Rufer
  - Beweis der Vorbedingung für jeden Aufruf
  - u.U. nicht ausreichend: Nachbedingung soll spezifisch für Parameter sein
    - separate Beweise pro Aufruf
  - Rekursive Aufrufe: Beweis durch Induktion über Rekursionstiefe
- Ausnahme: z.B. Rückführung auf bedingte Anweisungen
  - manuelle Transformation i.d.R. nicht praktikabel

# Programmverifizierer

- Verifikation zu großen Teilen mechanisch
  - Rückwärtsschließen
  - Umformulierung des Programms
  - Überprüfen der korrekten Anwendung von Schlußregeln
  - Aufstellung von Schleifeninvarianten schwer automatisierbar
- Programmverifizierer: Programme zur Durchführung von Verifikationen
  - oft integriert mit Theorembeweiser, um Implikationen zu beweisen oder Formeln zu vereinfachen
- Beispiel: Gumms *NPPV* (*New Paltz Program Verifier*)