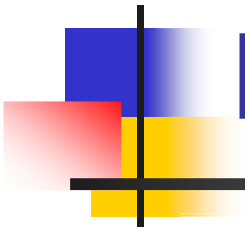
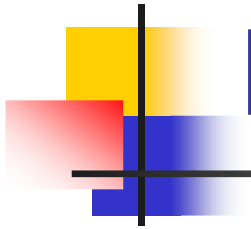


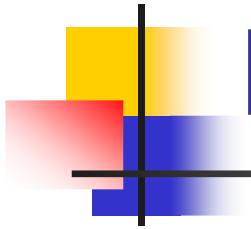
Die erste C++ Funktion

Funktionsdefinitionen- und
Aufrufe, Gültigkeitsbereich, Felder
als Funktionsargumente,
Bibliotheken, Standardfunktionen



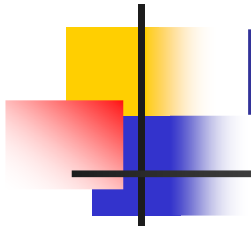
Funktionen

- kapseln häufig gebrauchte Funktionalität (z.B. Potenzberechnung) und machen sie einfach verfügbar



Funktionen

- kapseln häufig gebrauchte Funktionalität (z.B. Potenzberechnung) und machen sie einfach verfügbar
- strukturieren das Programm: Unterteilung in kleine Teilaufgaben, jede davon durch eine Funktion realisiert

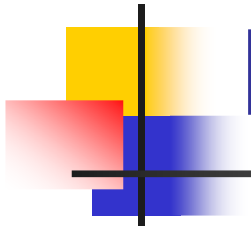


Funktionen

- kapseln häufig gebrauchte Funktionalität (z.B. Potenzberechnung) und machen sie einfach verfügbar
- strukturieren das Programm: Unterteilung in kleine Teilaufgaben, jede davon durch eine Funktion realisiert

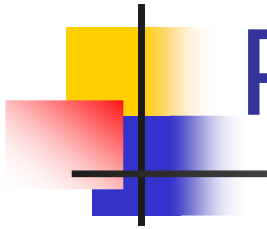
Prozedurales Programmieren
(später mehr dazu)

Funktion zur Potenzberechnung



```
// PRE:  e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
double pow (double b, int e)
{
  double result = 1.0;
  if (e < 0) {
    // b^e = (1/b)^(-e)
    b = 1.0/b;
    e = -e;
  }
  for (int i = 0; i < e; ++i) result *= b;
  return result;
}
```

Funktion zur Potenzberechnung



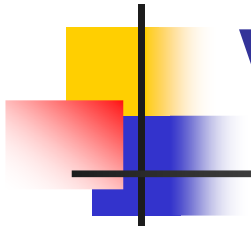
```
// PRE:  e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
double pow (double b, int e)
{
  double result = 1.0;
  if (e < 0) {
    // b^e = (1/b)^(-e)
    b = 1.0/b;
    e = -e;
  }
  for (int i = 0; i < e; ++i) result *= b;
  return result;
}
```

Vorbedingung

Nachbedingung

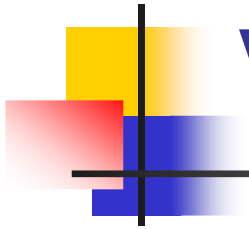
Programm zur Potenzberechnung

```
// Prog: callpow.cpp
// Define and call a function for computing powers.

#include <iostream>

// PRE:  e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
double pow (double b, int e)
{
  double result = 1.0;
  if (e < 0) {
    // b^e = (1/b)^(-e)
    b = 1.0/b;
    e = -e;
  }
  for (int i = 0; i < e; ++i) result *= b;
  return result;
}

int main()
{
  std::cout << pow( 2.0, -2) << "\n"; // outputs 0.25
  std::cout << pow( 1.5,  2) << "\n"; // outputs 2.25
  std::cout << pow( 5.0,  1) << "\n"; // outputs 5
  std::cout << pow( 3.0,  4) << "\n"; // outputs 81
  std::cout << pow(-2.0,  9) << "\n"; // outputs -512

  return 0;
}
```



Vor-und Nachbedingungen

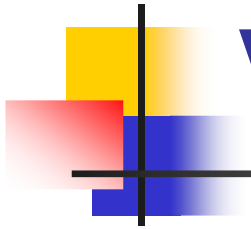
- beschreiben (möglichst vollständig) was die Funktion “macht”
- dokumentieren die Funktion für Benutzer (wir selbst oder andere)
- machen Programme lesbarer: wir müssen nicht verstehen, *wie* die Funktion es macht
- werden vom Compiler ignoriert



Vorbedingungen

Vorbedingung (*precondition*):

- was muss bei Funktionsaufruf gelten?
- spezifiziert *Definitionsbereich* der Funktion



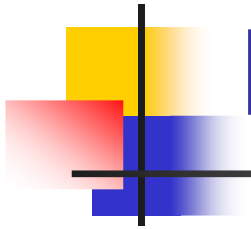
Vorbedingungen

Vorbedingung (*precondition*):

- was muss bei Funktionsaufruf gelten?
- spezifiziert *Definitionsbereich* der Funktion

0^e ist für e<0 undefiniert:

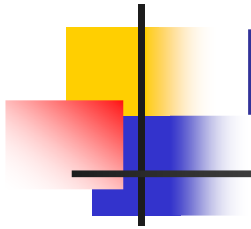
```
// PRE:   e >= 0 || b != 0.0
```



Nachbedingungen

Nachbedingung (*postcondition*):

- was gilt nach dem Funktionsaufruf ?
- spezifiziert *Wert* und *Effekt* des Funktionsaufrufs



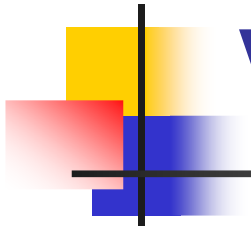
Nachbedingungen

Nachbedingung (*postcondition*):

- was gilt nach dem Funktionsaufruf ?
- spezifiziert *Wert* und *Effekt* des Funktionsaufrufs

Hier: nur Wert, kein Effekt:

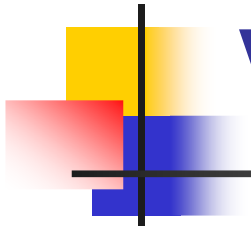
```
// POST: return value is b^e
```



Vor-und Nachbedingungen

- sind korrekt, wenn immer gilt:

  Wenn die Vorbedingung beim Funktionsaufruf gilt, *dann* gilt auch die Nachbedingung nach dem Funktionsaufruf.

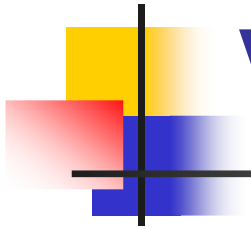


Vor-und Nachbedingungen

- sind korrekt, wenn immer gilt:

  Wenn die Vorbedingung beim Funktionsaufruf gilt, *dann* gilt auch die Nachbedingung nach dem Funktionsaufruf.

- Gilt Vorbedingung beim Funktionsaufruf nicht, so machen wir keine Aussage!



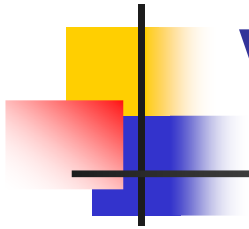
Vor-und Nachbedingungen

- sind korrekt, wenn immer gilt:

  Wenn die Vorbedingung beim Funktionsaufruf gilt, *dann* gilt auch die Nachbedingung nach dem Funktionsaufruf.

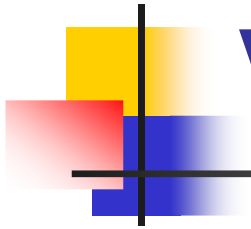
- Gilt Vorbedingung beim Funktionsaufruf nicht, so machen wir keine Aussage!

C++-Standard-Jargon: “undefined behavior”



Vor-und Nachbedingungen

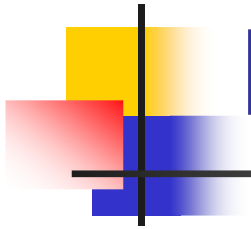
- Vorbedingung sollte so *schwach* wie möglich sein (möglichst grosser Definitionsbereich)



Vor-und Nachbedingungen

- Vorbedingung sollte so *schwach* wie möglich sein (möglichst grosser Definitionsbereich)
- Nachbedingung sollte so *stark* wie möglich sein (möglichst detaillierte Aussage)

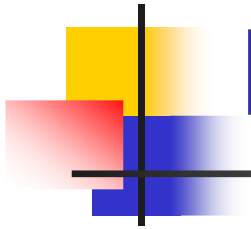
Arithmetische Vor-und Nachbedingungen



```
// PRE:  e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
```

sind formal inkorrekt:

Arithmetische Vor-und Nachbedingungen

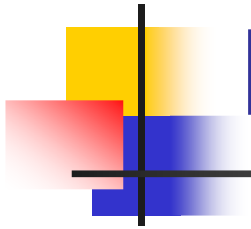


```
// PRE:  e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
```

sind formal inkorrekt:

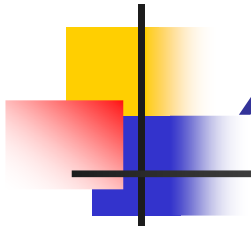
- Überlauf, falls e oder b zu gross sind
- b^e vielleicht nicht als **`double`** Wert darstellbar (Löcher im Wertebereich)

Arithmetische Vor-und Nachbedingungen



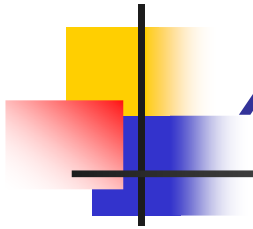
```
// PRE:  e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
```

Die exakten Vor- und Nachbedingungen sind plattformabhängig und meist sehr hässlich. Wir abstrahieren und geben die mathematischen Bedingungen an.



Assertions

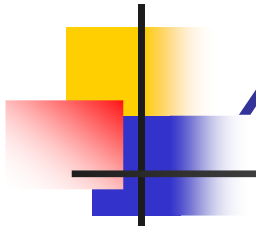
- Vorbedingungen sind nur Kommentare, wie können wir *sicherstellen,* dass sie beim Funktionsaufruf gelten?



Assertions

- Vorbedingungen sind nur Kommentare, wie können wir *sicherstellen,* dass sie beim Funktionsaufruf gelten?

```
// PRE:  e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
double pow (double b, int e)
{
  assert (e >= 0 || b != 0.0);
  double result = 1.0;
  // der Rest ist wie vorher...
  ...
}
```



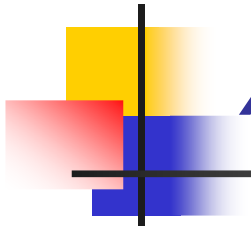
Assertions

- Vorbedingungen sind nur Kommentare, wie können wir *sicherstellen,* dass sie beim Funktionsaufruf gelten?

```
// PRE:  e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
double pow (double b, int e)
{
  assert (e >= 0 || b != 0.0);
  double result = 1.0;
  // der Rest ist wie vorher...
  ...
}
```

`assert` (*expression*)

Ausdruck, dessen Wert nach **`bool`** konvertierbar ist



Assertions

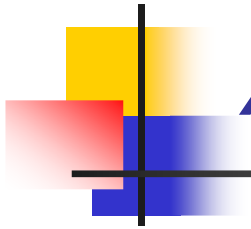
- Vorbedingungen sind nur Kommentare, wie können wir *sicherstellen,* dass sie beim Funktionsaufruf gelten?

```
// PRE:  e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
double pow (double b, int e)
{
  assert (e >= 0 || b != 0.0);
  double result = 1.0;
  // der Rest ist wie vorher...
  ...
}
```

Falls *expression* Wert *true* hat: kein Effekt.

`assert` (*expression*)

Ausdruck, dessen Wert nach **`bool`** konvertierbar ist



Assertions

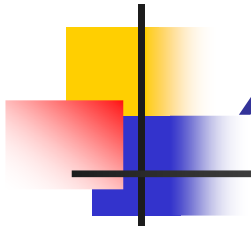
- Vorbedingungen sind nur Kommentare, wie können wir *sicherstellen,* dass sie beim Funktionsaufruf gelten?

```
// PRE:  e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
double pow (double b, int e)
{
  assert (e >= 0 || b != 0.0);
  double result = 1.0;
  // der Rest ist wie vorher...
  ...
}
```

Falls *expression* Wert *false* hat: Programm wird mit entsprechender Fehlermeldung abgebrochen.

`assert` (*expression*)

Ausdruck, dessen Wert nach **`bool`** konvertierbar ist



Assertions

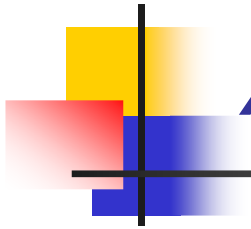
Wenn das fertige Programm einmal alle Assertions "überlebt", so können wir den Compiler anweisen, sie "hinauszukompilieren" (kein Laufzeitverlust!).

```
// PRE:  e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
double pow (double b, int e)
{
  assert (e >= 0 || b != 0.0);
  double result = 1.0;
  // der Rest ist wie vorher...
  ...
}
```

Falls *expression* Wert *false* hat: Programm wird mit entsprechender Fehlermeldung abgebrochen.

`assert` (*expression*)

Ausdruck, dessen Wert nach **`bool`** konvertierbar ist



Assertions

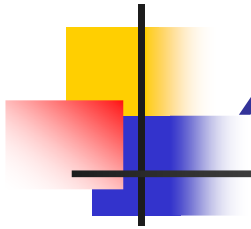
Assertions sind ein wichtiges Werkzeug zur Fehlervermeidung während der Programmentwicklung, wenn man sie *konsequent* und *oft* einsetzt.

```
// PRE:  e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
double pow (double b, int e)
{
  assert (e >= 0 || b != 0.0);
  double result = 1.0;
  // der Rest ist wie vorher...
  ...
}
```

Falls *expression* Wert *false* hat: Programm wird mit entsprechender Fehlermeldung abgebrochen.

`assert` (*expression*)

Ausdruck, dessen Wert nach **`bool`** konvertierbar ist



Assertions

`#include <cassert>`

Assertions sind ein wichtiges Werkzeug zur Fehlervermeidung während der Programmentwicklung, wenn man sie *konsequent* und *oft* einsetzt.

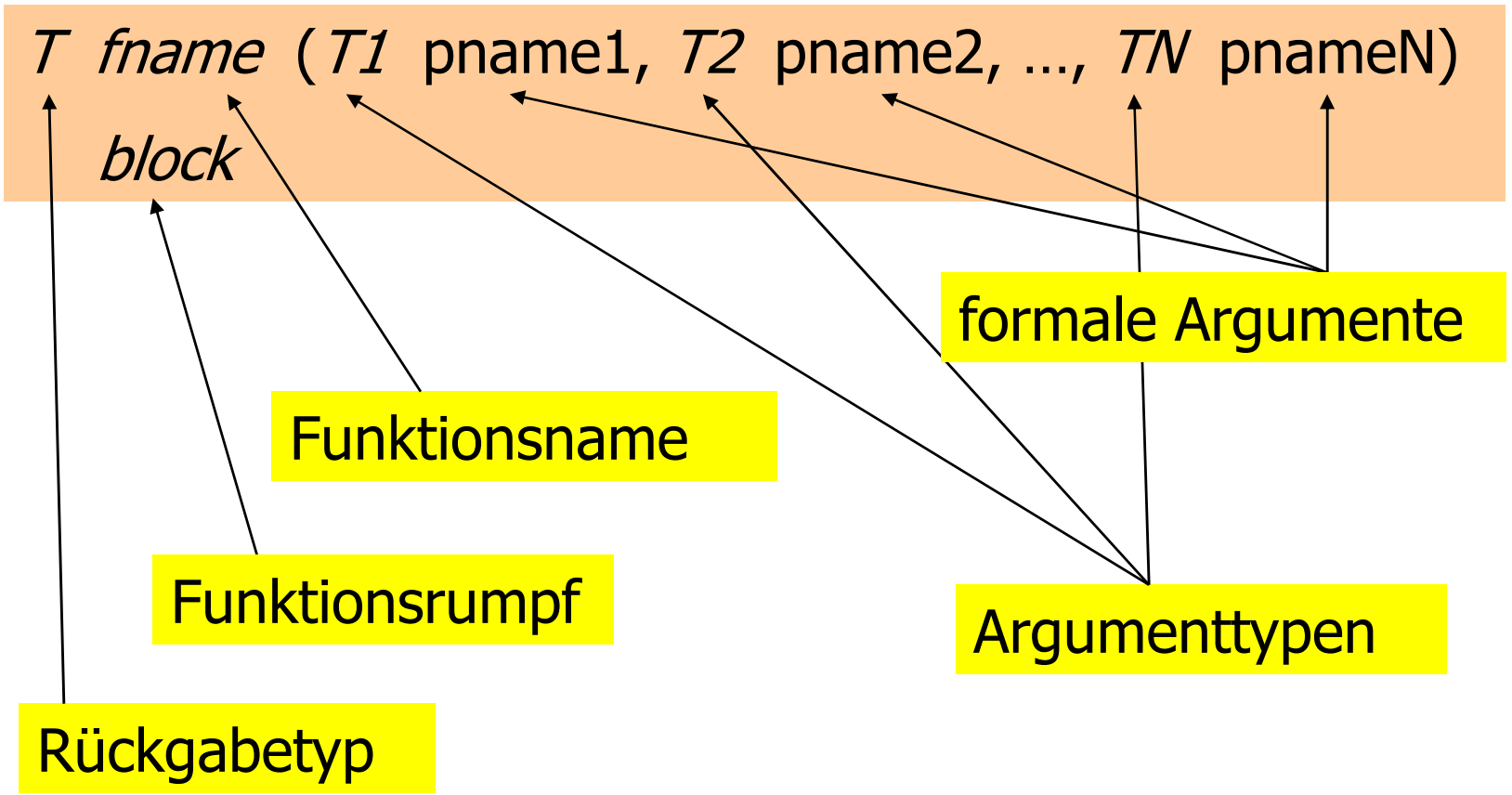
```
// PRE:  e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
double pow (double b, int e)
{
  assert (e >= 0 || b != 0.0);
  double result = 1.0;
  // der Rest ist wie vorher...
  ...
}
```

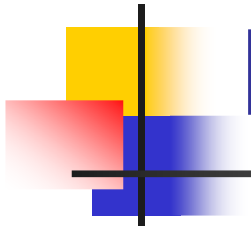
Falls *expression* Wert *false* hat: Programm wird mit entsprechender Fehlermeldung abgebrochen.

`assert` (*expression*)

Ausdruck, dessen Wert nach **`bool`** konvertierbar ist

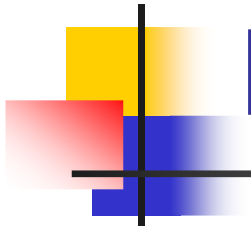
Funktionsdefinitionen





Funktionsdefinitionen

- dürfen nicht *lokal* (in Blocks, anderen Funktionen oder Kontrollanweisungen) auftreten
- können im Programm ohne Trennsymbole aufeinander folgen



Funktionsdefinitionen

- können im Programm ohne Trennsymbole aufeinander folgen

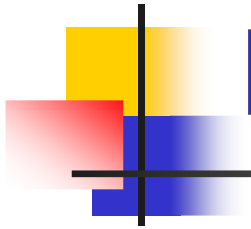
```
int foo (int x)
{
   return x;
}
int bar (int x)
{
   return x + 1;
}
```

Funktionsdefinitionen

- können im Programm ohne Trennsymbole aufeinander folgen

```
int foo (int x)
{
   return x;
}
int bar (int x)
{
   return x + 1;
}
```

Diese Namen haben sich für inhaltsleere Funktionen eingebürgert, die lediglich C++ Aspekte demonstrieren.



Funktionsdefinitionen

- können ohne Trennsymbole aufeinander folgen

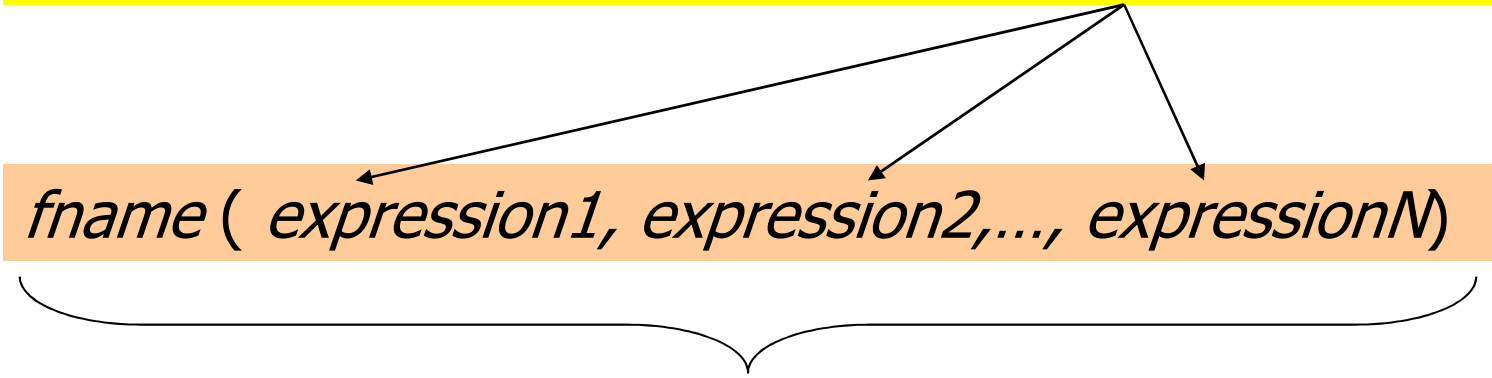
```
int foo (int x)
{
   return x;
}
int bar (int x)
{
   return x + 1;
}
```

```
double pow (double b, int e)
{
   ...
}
int main ()
{
   ...
}
```

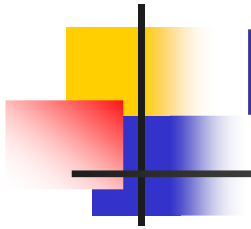
Funktionsaufrufe

(z.B. **`pow (2.0, -2)`**)

Aufrufargumente (Typen konvertierbar in *T1,…,TN*)



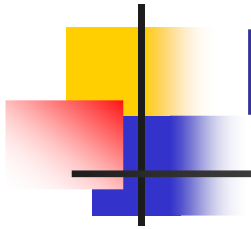
Ausdruck vom Typ *T* (Wert und Effekt
wie in der Nachbedingung von *fname*)



Funktionsaufrufe

Für die Typen, die wir bisher kennen, gilt:

- Aufrufargumente sind R-Werte
- Funktionsaufruf selbst ist R-Wert



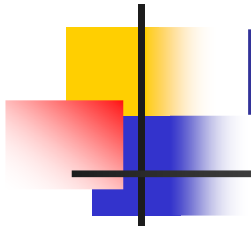
Funktionsaufrufe

Für die Typen, die wir bisher kennen, gilt:

- Aufrufparameter sind R-Werte
- Funktionsaufruf selbst ist R-Wert

fname : R-Wert × R-Wert × … × R-Wert ⟶ R-Wert

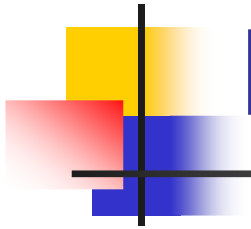
Auswertung eines Funktionsaufrufs



- Auswertung der Aufrufargumente
- Initialisierung der formalen Argumente mit den resultierenden Werten
- Ausführung des Funktionsrumpfes: formale Argumente verhalten sich dabei wie lokale Variablen
- Ausführung endet mit

  `return` *expression;*

Auswertung eines Funktionsaufrufs

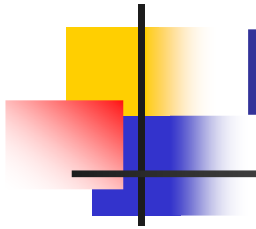


- Auswertung der Aufrufargumente
- Initialisierung der formalen Argumente mit den resultierenden Werten
- Ausführung des Funktionsrumpfes: formale Argumente verhalten sich dabei wie lokale Variablen
- Ausführung endet mit

  `return` *expression;*

Rückgabewert: Wert des Funktionsaufrufs

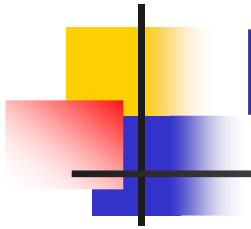
Auswertung eines Funktionsaufrufs: Beispiel



```
pow (2.0, -2)
```

```
double pow (double b, int e)
{
  double result = 1.0;
  if (e < 0) {
    // b^e = (1/b)^(-e)
    b = 1.0/b;
    e = -e;
  }
  for (int i = 0; i < e; ++i)
     result *= b;
  return result;
}
```

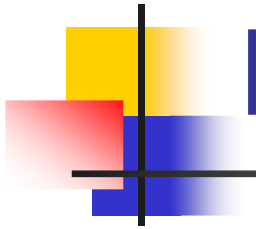
Auswertung eines Funktionsaufrufs: Beispiel



```
pow (2.0, -2)
```

```
double pow (double b, int e)
{ // b = 2.0; e = -2;
  double result = 1.0;
  if (e < 0) {
    // b^e = (1/b)^(-e)
    b = 1.0/b;
    e = -e;
  }
  for (int i = 0; i < e; ++i)
     result *= b;
  return result;
}
```

Auswertung eines Funktionsaufrufs: Beispiel



```
pow (2.0, -2)
```

```
double pow (double b, int e)
{ // b = 2.0; e = -2;
  double result = 1.0;
  if (e < 0) {
    // b^e = (1/b)^(-e)
    b = 1.0/b; // b = 0.5;
    e = -e;    // e = 2;
  }
  for (int i = 0; i < e; ++i)
     result *= b;
  return result;
}
```

Auswertung eines Funktionsaufrufs: Beispiel

```
pow (2.0, -2)
```

```
double pow (double b, int e)
{ // b = 2.0; e = -2;
  double result = 1.0;
  if (e < 0) {
    // b^e = (1/b)^(-e)
    b = 1.0/b; // b = 0.5;
    e = -e;    // e = 2;
  }
  for (int i = 0; i < e; ++i)
    result *= b; // 0.5
  return result;
}
```

i==0 →

Auswertung eines Funktionsaufrufs: Beispiel

```
pow (2.0, -2)
```

```
double pow (double b, int e)
{ // b = 2.0; e = -2;
  double result = 1.0;
  if (e < 0) {
    // b^e = (1/b)^(-e)
    b = 1.0/b; // b = 0.5;
    e = -e;    // e = 2;
  }
  for (int i = 0; i < e; ++i)
    result *= b; // 0.25
  return result;
}
```

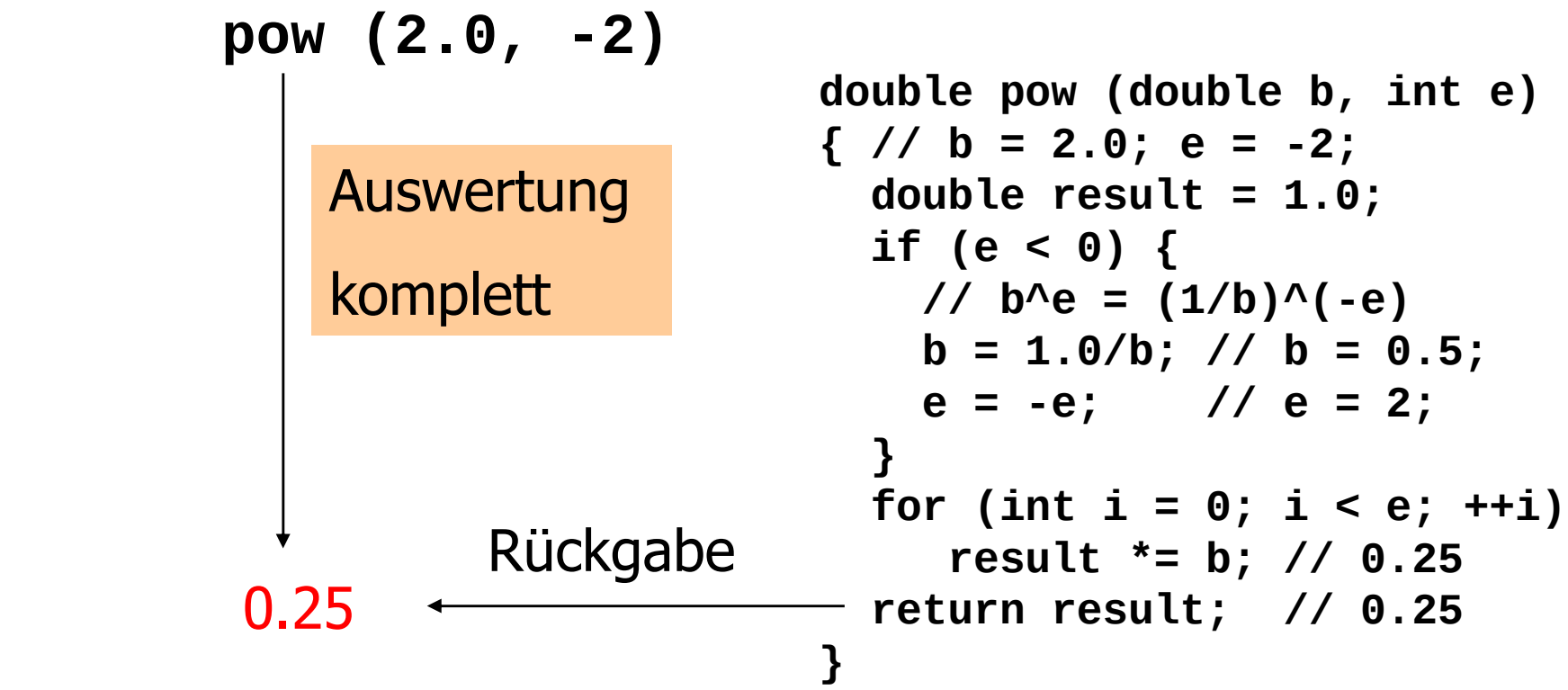
i==1 →

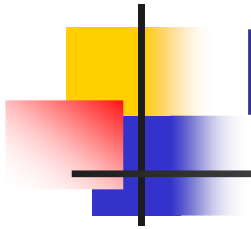
Auswertung eines Funktionsaufrufs: Beispiel

```
pow (2.0, -2)
```

```
double pow (double b, int e)
{ // b = 2.0; e = -2;
  double result = 1.0;
  if (e < 0) {
    // b^e = (1/b)^(-e)
    b = 1.0/b; // b = 0.5;
    e = -e;    // e = 2;
  }
  for (int i = 0; i < e; ++i)
     result *= b; // 0.25
  return result;  // 0.25
}
```

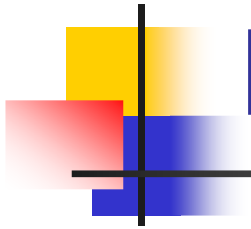
Auswertung eines Funktionsaufrufs: Beispiel





Der Typ void

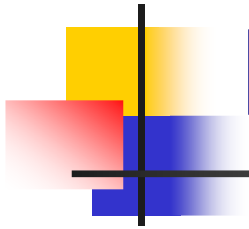
- fundamentaler Typ (Wertebereich leer)
- Verwendung als Rückgabetyp für Funktionen, die *nur* Effekt haben



Der Typ void

- fundamentaler Typ (Wertebereich leer)
- Verwendung als Rückgabetyp für Funktionen, die *nur* Effekt haben

```
// POST: "(i, j)" has been written to standard output
void print_pair (const int i, const int j)
{
  std::cout << "(" << i << ", " << j << ")\n";
}

int main()
{
  print_pair(3,4); // outputs  (3, 4)
}
```

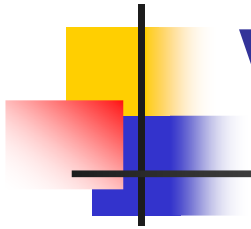


Der Typ void

- fundamentaler Typ (Wertebereich leer)
- Verwendung als Rückgabetyp für Funktionen, die *nur* Effekt haben

```
// POST: "(i, j)" has been written to standard output
void print_pair (const int i, const int j)
{
  std::cout << "(" << i << ", " << j << ")\n";
}

int main()
{
  print_pair(3,4); // outputs  (3, 4)
}
```

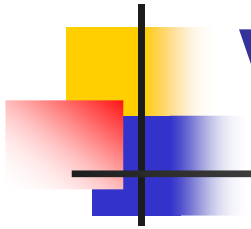
Void-Funktion



Void-Funktionen

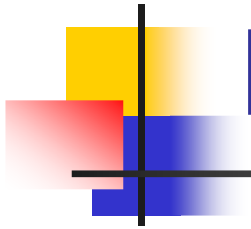
- brauchen kein **`return`**
- Ausführung endet, wenn Ende des Funktionsrumpfes erreicht wird

Void-Funktionen



- brauchen kein **`return`**
- Ausführung endet, wenn Ende des Funktionsrumpfes erreicht wird, oder…
- **`return;`** erreicht wird, oder…
- **`return`** *expression* **`;`** erreicht wird

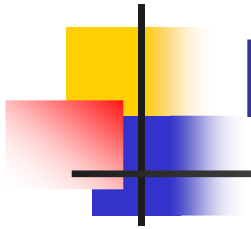
Ausdruck vom Typ **`void`** **`(`**z.B. Aufruf einer Funktion mit Rückgabetyp **`void`**)



Formale Funktionsargumente

- Deklarative Region: Funktionsdefinition
- sind ausserhalb der Funktionsdefinition *nicht* sichtbar
- werden bei jedem Aufruf der Funktion neu angelegt (automatische Speicherdauer)
- Änderungen ihrer Werte haben keinen Einfluss auf die Werte der Aufrufargumente (Aufrufargumente sind R-Werte)

Gültigkeitsbereich formaler Funktionsargumente: Beispiel 1



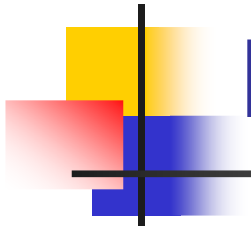
```
int main() {
  double b = 2.0;
  int e = -2;
  std::cout << pow(b,e); // outputs 0.25
  std::cout << b;        // outputs 2
  std::cout << e;        // outputs -2

  return 0;
}
```

Gültigkeitsbereich formaler Funktionsargumente: Beispiel 1

```
int main() {
  double b = 2.0;
  int e = -2;
  std::cout << pow(b,e); // outputs 0.25
  std::cout << b;        // outputs 2
  std::cout << e;        // outputs -2

  return 0;
}
```

nicht die **b** und **e** in der Definition von pow, sondern die hier definierten Variablen lokal zum Rumpf von **main**

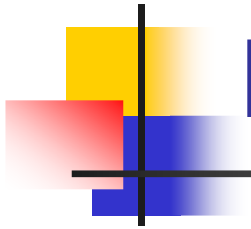
Gültigkeitsbereich formaler Funktionsargumente: Beispiel 2



Lokale Variablen im Funktionsrumpf dürfen nicht so heissen wie ein formales Argument:

```
int f (int i)
{
  int i = 5; // ungültig; i versteckt Argument
  return i;
}
```

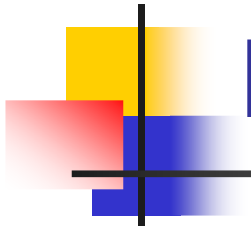
Gültigkeitsbereich formaler Funktionsargumente: Beispiel 2



Lokale Variablen im Funktionsrumpf dürfen nicht so heissen wie ein formales Argument, ausser sie sind in einem geschachtelten Block deklariert:

```
int f (int i)
{
  {
    int i = 5; // ok; i ist lokal zum Block
  }
  return i; // das formale Argument
}
```

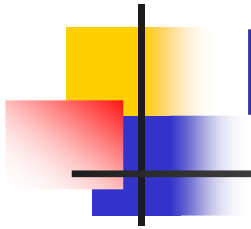
Gültigkeitsbereich formaler Funktionsargumente: Beispiel 2



Lokale Variablen im Funktionsrumpf dürfen nicht so heissen wie ein formales Argument, ausser sie sind in einem geschachtelten Block deklariert:

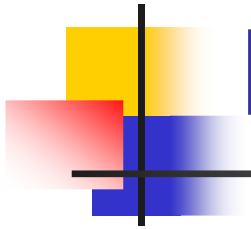
```
int f (int i)
{
  {
    int i = 5; // syntaktisch ok, aber schlechter
  }            // Stil
  return i; // das formale Argument
}
```

Gültigkeitsbereich einer Funktion



- ist der Teil des Programms, in dem die Funktion aufgerufen werden kann
- ist definiert als die Vereinigung der Gültigkeitsbereiche aller ihrer *Deklarationen*

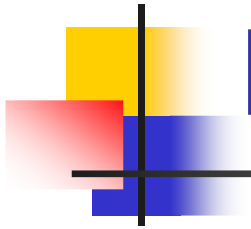
Gültigkeitsbereich einer Funktion



- ist der Teil des Programms, in dem die Funktion aufgerufen werden kann
- ist definiert als die Vereinigung der Gültigkeitsbereiche aller ihrer *Deklarationen* (es kann mehrere geben)

Deklaration: wie Definition, aber ohne *block*

Gültigkeitsbereich einer Funktion

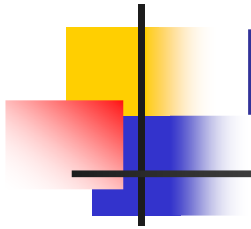


- ist der Teil des Programms, in dem die Funktion aufgerufen werden kann
- ist definiert als die Vereinigung der Gültigkeitsbereiche aller ihrer *Deklarationen* (es kann mehrere geben)

Deklaration: wie Definition, aber ohne *block*

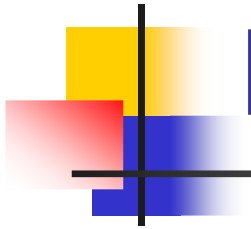
Beispieldeklaration: `double pow (double b, int e)`

Gültigkeitsbereich einer Funktion: Beispiel



```
#include<iostream>

int main()
{
  std::cout << f(1); // Fehler: f undeklariert
  return 0;
}

int f (const int i) // Gültigkeitsbereich von f
                    // ab hier
{
  return i;
}
```

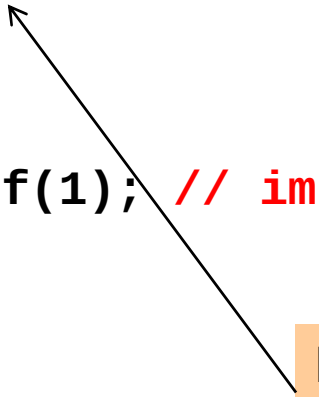
Gültigkeitsbereich einer Funktion: Beispiel



```
#include<iostream>

int f (int i); // Gültigkeitsbereich von f ab hier

int main()
{
  std::cout << f(1); // im Gültigkeitsbereich, ok
  return 0;
}

int f (const int i)
{
  return i;
}
```

Gültigkeitsbereich einer Funktion: Beispiel

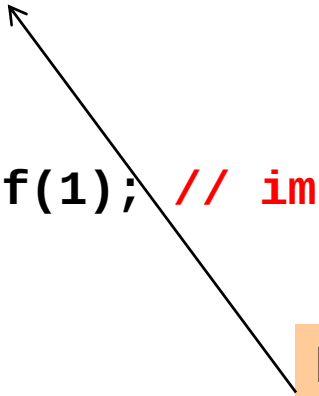
```
#include<iostream>

int f (int i); // Gültigkeitsbereich von f ab hier

int main()
{
  std::cout << f(1); // im Gültigkeitsbereich, ok
  return 0;
}

int f (const int i)
{
  return i;
}
```



Bei Deklaration:
const int äquivalent zu **int**

Gültigkeitsbereich einer Funktion: Beispiel

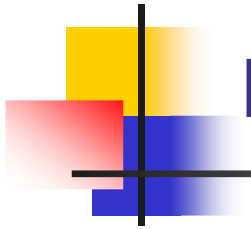
```
#include<iostream>

int f (int i); // Gültigkeitsbereich von f ab hier

int main()
{
  std::cout << f(1); // im Gültigkeitsbereich, ok
  return 0;
}

int f (const int i)
{
  return i;
}
```



Bei Deklaration:
const int äquivalent zu **int**

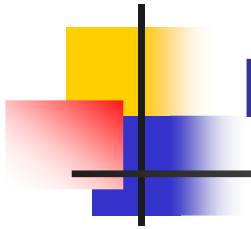
Grund: Das Verhalten der Funktion "nach aussen" ist unabhängig davon

Separate Deklarationen sind manchmal notwendig: Problem

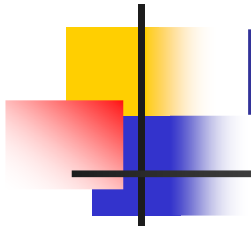


```
int f (…) // Gültigkeitsbereich von f ab hier
{
    g(…) // f ruft g auf, aber g ist undeklariert
}

int g (…) // Gültigkeitsbereich von g ab hier
{
    f(…) // g ruft f auf, ok
}
```

Separate Deklarationen sind manchmal notwendig: Problem

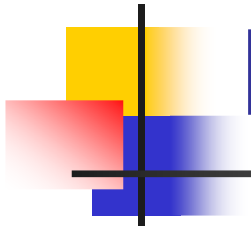


```
int g (…); // Gültigkeitsbereich von g ab hier

int f (…) // Gültigkeitsbereich von f ab hier
{
    g(…) // f ruft g auf, ok
}

int g (…)
{
    f(…) // g ruft f auf, ok
}
```



Prozedurales Programmieren

- Funktionen erlauben die Zerlegung der Gesamtaufgabe in klar abgegrenzte Teilaufgaben



Prozedurales Programmieren

- Funktionen erlauben die Zerlegung der Gesamtaufgabe in klar abgegrenzte Teilaufgaben
- Bei Verwendung “sprechender” Funktionsnamen wird das Gesamt-programm viel übersichtlicher und verständlicher

Prozedurales Programmieren: Berechnung perfekter Zahlen

Bisher (Musterlösung)

```
// input
std::cout << "Find perfect numbers up to n =? ";
unsigned int n;
std::cin >> n;

// computation and output
std::cout << "The following numbers are perfect.\n";
for (unsigned int i = 1; i <= n ; ++i) {
  // check whether i is perfect
  unsigned int sum = 0;
  for (unsigned int d = 1; d < i; ++d)
    if (i % d == 0) sum += d;
  if (sum == i)
    std::cout << i << " ";
}
```

Prozedurales Programmieren: Berechnung perfekter Zahlen

Bisher (Musterlösung)

```
// input
std::cout << "Find perfect numbers up to n =? ";
unsigned int n;
std::cin >> n;

// computation and output
std::cout << "The following numbers are perfect.\n";
for (unsigned int i = 1; i <= n ; ++i) {
  // check whether i is perfect
  unsigned int sum = 0;
  for (unsigned int d = 1; d < i; ++d)
    if (i % d == 0) sum += d;
  if (sum == i)
    std::cout << i << " ";
}
```

Was ist nochmal eine perfekte Zahl???

Geschachtelte Schleifen

Prozedurales Programmieren: Berechnung perfekter Zahlen

Neu mit Funktionen

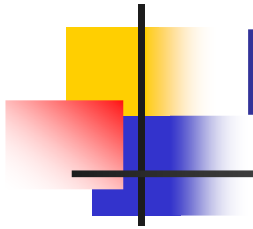
```
// POST: return value is the sum of all divisors of i
//       that are smaller than i
unsigned int sum_of_proper_divisors (const unsigned int i)
{
  unsigned int sum = 0;
  for (unsigned int d = 1; d < i; ++d)
    if (i % d == 0) sum += d;
  return sum;
}

// POST: return value is true if and only if i is a
//       perfect number
bool is_perfect (const unsigned int i)
{
  return sum_of_proper_divisors (i) == i;
}
```

Prozedurales Programmieren: Berechnung perfekter Zahlen

Neu mit Funktionen

```
int main()
{
  // input
  std::cout << "Find perfect numbers up to n =? ";
  unsigned int n;
  std::cin >> n;

  // computation and output
  std::cout << "The following numbers are perfect.\n";
  for (unsigned int i = 1; i <= n ; ++i)
    if (is_perfect (i)) std::cout << i << " ";
  std::cout << "\n";

  return 0;
}
```

Prozedurales Programmieren: Berechnung perfekter Zahlen

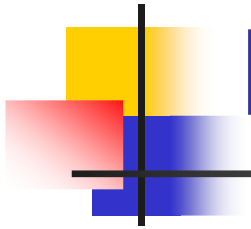


Neu mit Funktionen

```
int main()
{
  // input
  std::cout << "Find perfect numbers up to n =? ";
  unsigned int n;
  std::cin >> n;

  // computation and output
  std::cout << "The following numbers are perfect.\n";
  for (unsigned int i = 1; i <= n ; ++i)
    if (is_perfect (i)) std::cout << i << " ";
  std::cout << "\n";

  return 0;
}
```

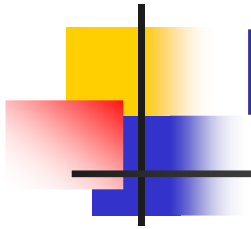
Das Programm ist selbsterklärend

keine geschachtelten Schleifen mehr



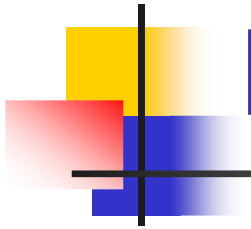
Prozedurales Programmieren

- Bisher konnten wir nur ohne Funktionen leben, weil die Programme meistens einfach und kurz waren



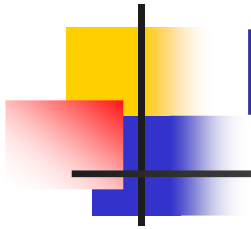
Prozedurales Programmieren

- Bisher konnten wir nur ohne Funktionen leben, weil die Programme meistens einfach und kurz waren
- Bei komplizierteren Aufgaben schreibt man ohne Funktionen leicht *Spaghetti-Code*



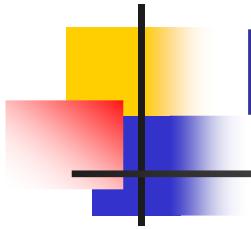
Prozedurales Programmieren

- Bisher konnten wir nur ohne Funktionen leben, weil die Programme meistens einfach und kurz waren
- Bei komplizierteren Aufgaben schreibt man ohne Funktionen leicht *Spaghetti-Code,* so wie in der...
- ...Programmiersprache BASIC (1963+)



Felder als Funktionsargumente

- Zu Erinnerung: wir können Felder nicht mit anderen Feldern initialisieren

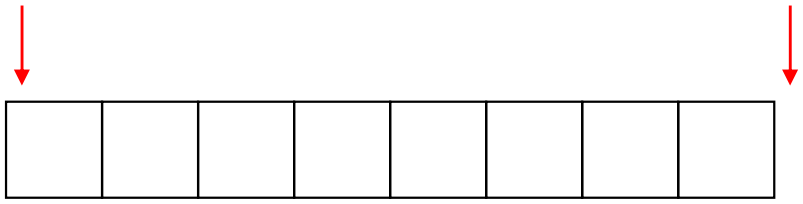


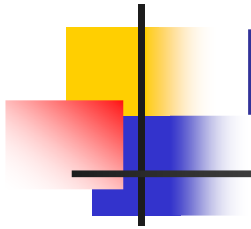
Felder als Funktionsargumente

- Zu Erinnerung: wir können Felder nicht mit anderen Feldern initialisieren
- Genau das bräuchten wir aber, wenn wir Felder als Funktionsargumente benutzen wollten!

Felder als Funktionsargumente

- Zu Erinnerung: wir können Felder nicht mit anderen Feldern initialisieren
- Genau das bräuchten wir aber, wenn wir Felder als Funktionsargumente benutzen wollten!
- Lösung: wir übergeben das Feld mittels zwei Zeigern!





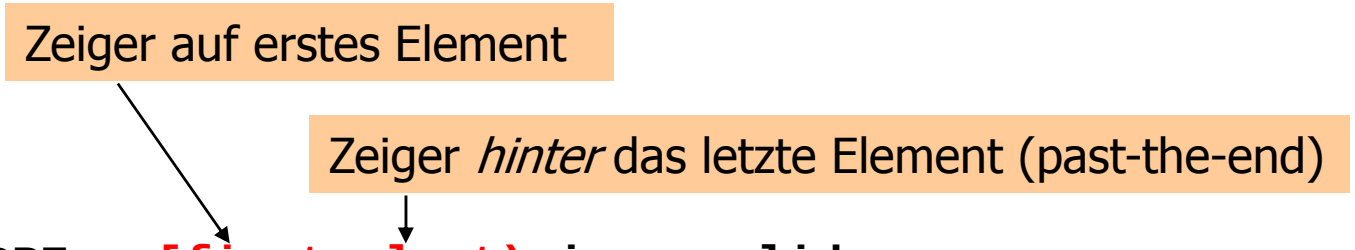
Felder als Funktionsargumente

- Beispiel: Füllen aller Feldelemente mit einem festen Wert

```
// PRE:  [first, last) is a valid range
// POST: *p is set to value, for p in [first, last)
void fill (int* first, int* last, const int value) {
  // iteration by pointer
  for (int* p = first; p != last; ++p)
    *p = value;
}
```

Felder als Funktionsargumente

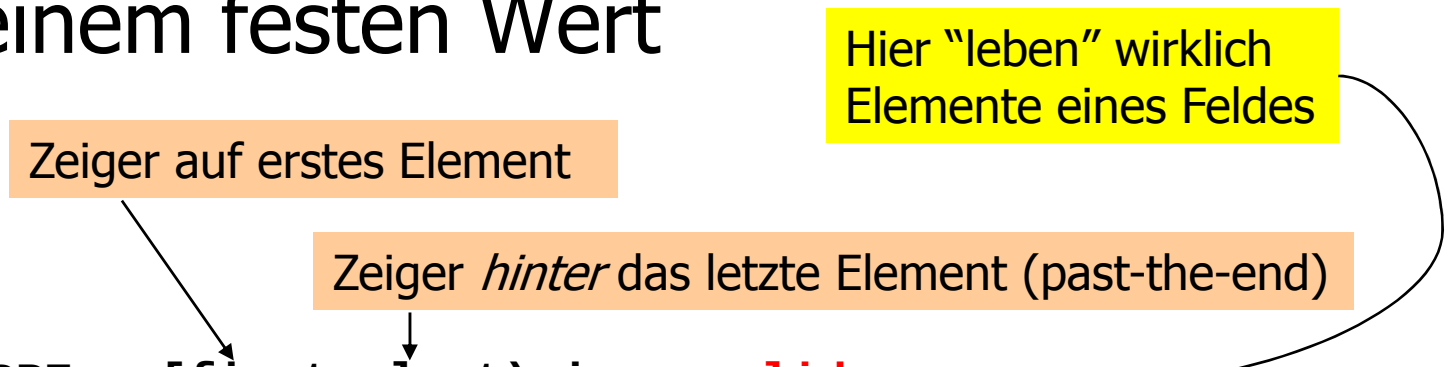
- Beispiel: Füllen aller Feldelemente mit einem festen Wert




```
// PRE:  [first, last) is a valid range
// POST: *p is set to value, for p in [first, last)
void fill (int* first, int* last, const int value) {
  // iteration by pointer
  for (int* p = first; p != last; ++p)
    *p = value;
}
```

Felder als Funktionsargumente

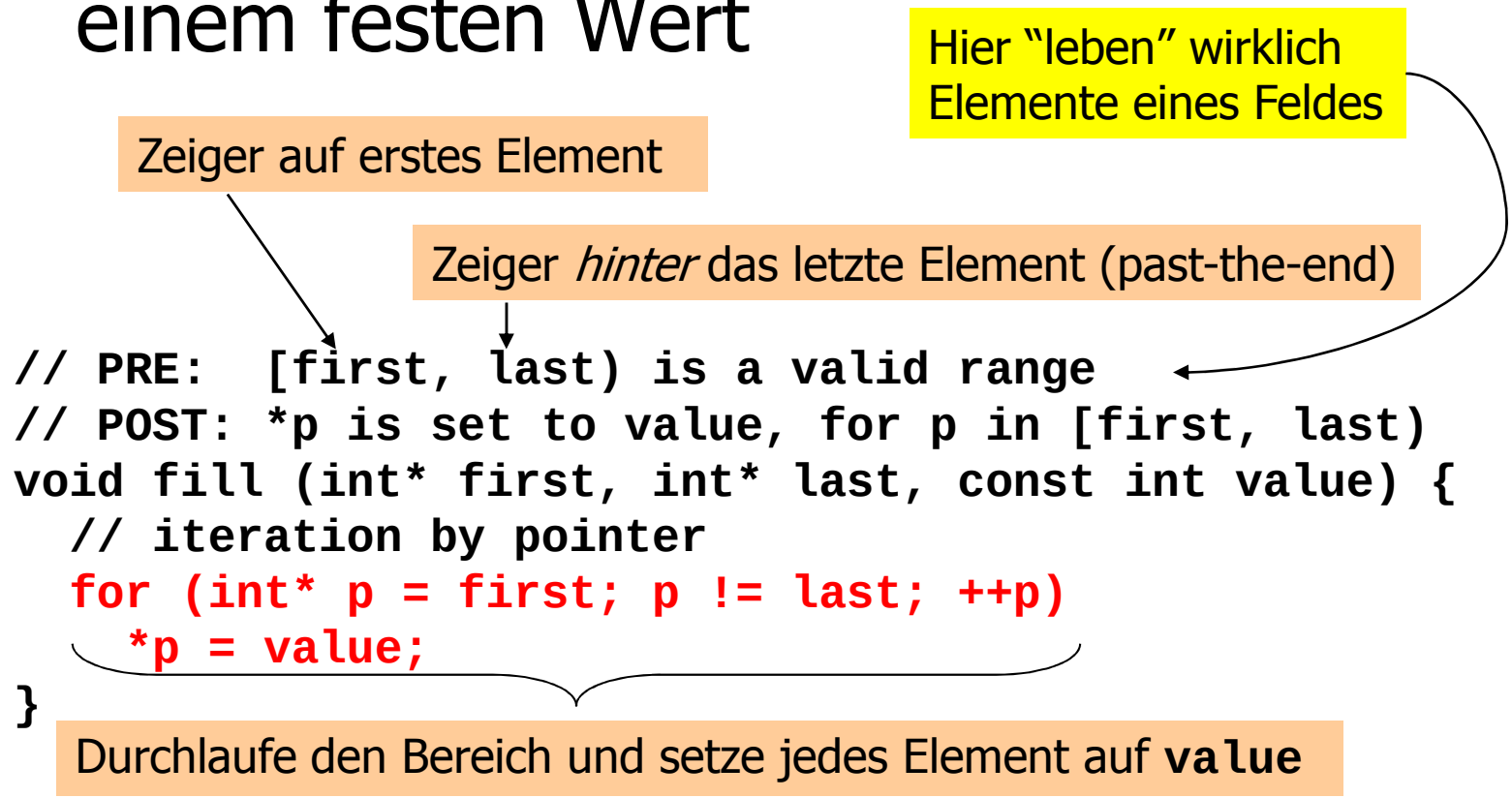
- Beispiel: Füllen aller Feldelemente mit einem festen Wert

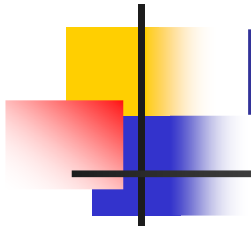



```
// PRE:  [first, last) is a valid range
// POST: *p is set to value, for p in [first, last)
void fill (int* first, int* last, const int value) {
  // iteration by pointer
  for (int* p = first; p != last; ++p)
    *p = value;
}
```

Felder als Funktionsargumente

- Beispiel: Füllen aller Feldelemente mit einem festen Wert

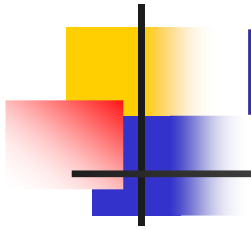




Felder als Funktionsargumente

- Anwendungsbeispiel:

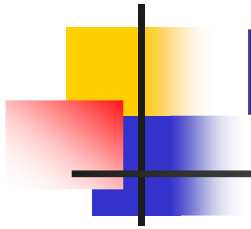
```
int main()
{
  int a[5];
  fill (a, a+5, 1); // a == {1, 1, 1, 1, 1}
  return 0;
}
```



Felder als Funktionsargumente

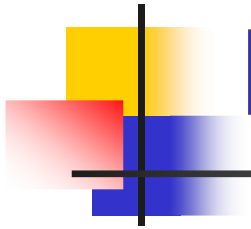
- Anwendungsbeispiel (unter Verwendung der Standardbibliothek):

```
#include <algorithm>
int main()
{
  int a[5];
  std::fill (a, a+5, 1); // a == {1, 1, 1, 1, 1}
  return 0;
}
```



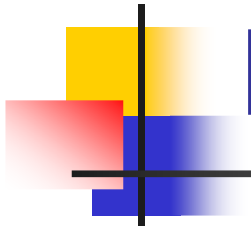
Mutierende Funktionen

- sind Funktionen, die Werte von Programmobjekten ändern.



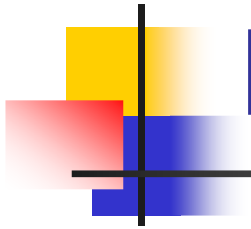
Mutierende Funktionen

- sind Funktionen, die Werte von Programmobjekten ändern.
- Beispiel: **`fill, std::fill`** (ändern Werte der Elemente eines Feldes)



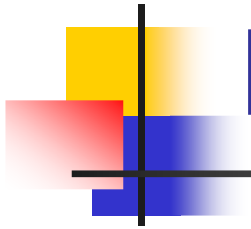
Mutierende Funktionen

- sind Funktionen, die Werte von Programmobjekten ändern.
- Beispiel: **`fill, std::fill`** (ändern Werte der Elemente eines Feldes)
- **`pow`** ist eine nichtmutierende Funktion.



Modularisierung

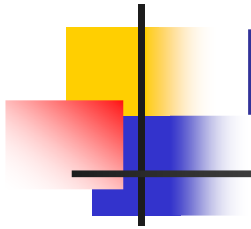
- Funktionen wie **`pow`**, **`fill`**, **`...`** sind in vielen Programmen nützlich.
- Es ist nicht sehr praktisch, die Funktionsdefinition in jedem solchen Programm zu wiederholen.
- Ziel: Auslagern der Funktion



Modularisierung: Auslagerung

Separate Datei **pow.cpp**:

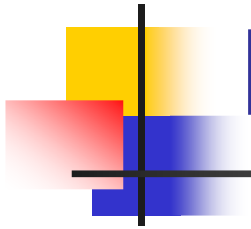
```
// PRE:  e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
double pow (double b, int e)
{
  double result = 1.0;
  if (e < 0) {
    // b^e = (1/b)^(-e)
    b = 1.0/b;
    e = -e;
  }
  for (int i = 0; i < e; ++i) result *= b;
  return result;
}
```



Modularisierung: Auslagerung

Aufrufendes Programm **`callpow2.cpp`**:

```
// Prog: callpow2.cpp
// Call a function for computing powers.

#include <iostream>
#include "pow.cpp"

int main()
{
  std::cout << pow( 2.0, -2) << "\n"; // outputs 0.25
  std::cout << pow( 1.5,  2) << "\n"; // outputs 2.25
  std::cout << pow( 5.0,  1) << "\n"; // outputs 5
  std::cout << pow( 3.0,  4) << "\n"; // outputs 81
  std::cout << pow(-2.0,  9) << "\n"; // outputs -512

  return 0;
}
```



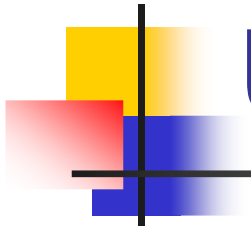
Modularisierung: Auslagerung

Aufrufendes Programm **`callpow2.cpp`**:

```
// Prog: callpow2.cpp
// Call a function for computing powers.

#include <iostream>
#include "pow.cpp"

int main()
{
  std::cout << pow( 2.0, -2) << "\n"; // outputs 0.25
  std::cout << pow( 1.5,  2) << "\n"; // outputs 2.25
  std::cout << pow( 5.0,  1) << "\n"; // outputs 5
  std::cout << pow( 3.0,  4) << "\n"; // outputs 81
  std::cout << pow(-2.0,  9) << "\n"; // outputs -512

  return 0;
}
```

Dateiangabe relativ zum Arbeitsverzeichnis

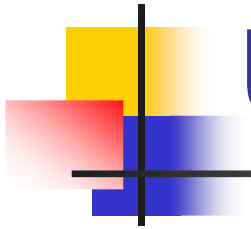
Modularisierung: getrennte Übersetzung



Problem der Auslagerung:

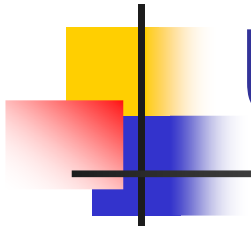
- **`#include`** kopiert den Inhalt der inkludierten Datei (**`pow.cpp`**) in das inkludierende Programm (**`callpow2.cpp`**)
- Compiler muss die Funktionsdefinition für jedes aufrufende Programm neu übersetzen.
- bei vielen und grossen Funktionen kann das jeweils sehr lange dauern.

Modularisierung: getrennte Übersetzung



- **`pow.cpp`** kann getrennt übersetzt werden (z.B. **`g++ -c pow.cpp`**)
- Resultat ist kein ausführbares Programm (**`main`** fehlt), sondern Objekt-Code **`pow.o`**

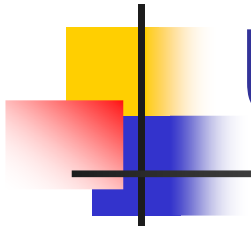
Modularisierung: getrennte Übersetzung



- **`pow.cpp`** kann getrennt übersetzt werden (z.B. **`g++ -c pow.cpp`**)
- Resultat ist kein ausführbares Programm (**`main`** fehlt), sondern Objekt-Code **`pow.o`**

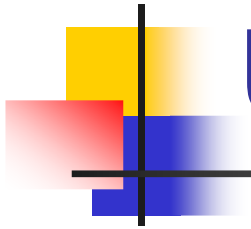
Maschinensprache-Befehle für Funktionsrumpf von **`pow`**

Modularisierung: getrennte Übersetzung



- Auch das aufrufende Programm kann getrennt übersetzt werden, ohne Kenntnis von **`pow.cpp`** oder **`pow.o`** !

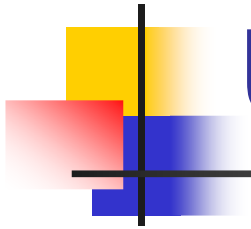
Modularisierung: getrennte Übersetzung



- Auch das aufrufende Programm kann getrennt übersetzt werden, ohne Kenntnis von **`pow.cpp`** oder **`pow.o`** !
- Compiler muss nur die *Deklaration* von **`pow`** kennen; diese schreiben wir in eine *Header*-Datei **`pow.h:`**

```
// PRE:  e >= 0 || b != 0.0
// POST: return value is b^e
double pow (double b, int e);
```

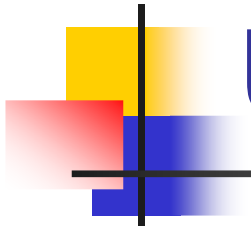
Modularisierung: getrennte Übersetzung



Aufrufendes Programm **callpow3.cpp:**

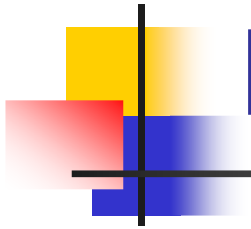
```
// Prog: callpow3.cpp
// Call a function for computing powers.

#include <iostream>
#include "pow.h"

int main()
{
  std::cout << pow( 2.0, -2) << "\n"; // outputs 0.25
  std::cout << pow( 1.5,  2) << "\n"; // outputs 2.25
  std::cout << pow( 5.0,  1) << "\n"; // outputs 5
  std::cout << pow( 3.0,  4) << "\n"; // outputs 81
  std::cout << pow(-2.0,  9) << "\n"; // outputs -512

  return 0;
}
```

Modularisierung: getrennte Übersetzung



- **`callpow3.cpp`** kann getrennt übersetzt werden (**`g++ -c callpow3.cpp`**)
- Resultat ist kein ausführbares Programm (**`pow`** fehlt), sondern Objekt-Code **`callpow3.o`**

Anstatt der Maschinensprache-Befehle für Funktionsrumpf von **`pow`** enthält **`callpow3.o`** einen *Platzhalter* für die Speicheradresse, unter der diese zu finden sein werden.



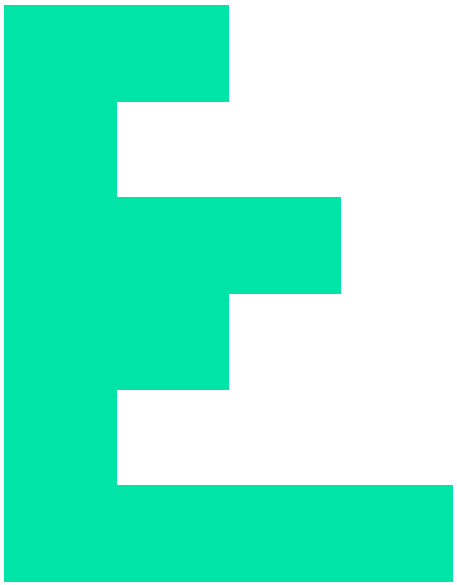
Modularisierung: Der Linker

- baut ausführbares Programm aus den relevanten Objekt-Codes (**`pow.o`** und **`callpow3.o`**) zusammen
- ersetzt dabei die Platzhalter für Funktionsrumpfadressen durch deren wirkliche Adressen im ausführbaren Programm

Modularisierung: Der Linker

`pow.o`

`callpow3.o`

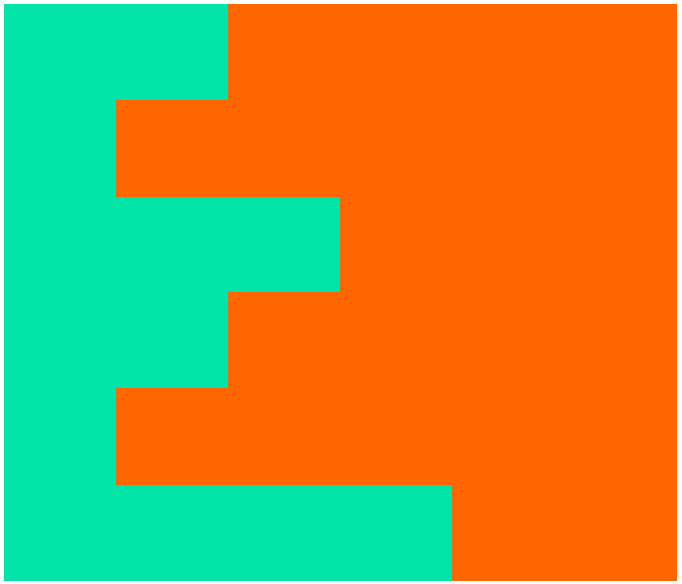


Maschinensprache für den Funktionsrumpf von **pow**

Maschinensprache für die Aufrufe von **pow**

Modularisierung: Der Linker

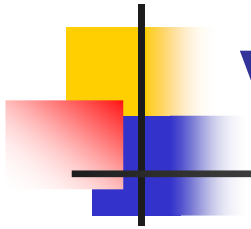
`callpow3` (ausführbares Programm)



Maschinensprache für den Funktionsrumpf von **pow**

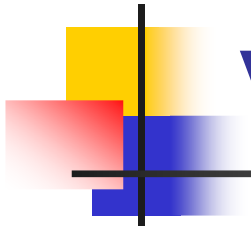
Maschinensprache für die Aufrufe von **pow**

Modularisierung: Verfügbarkeit von Quellcode



- **`pow.cpp`** (Quellcode) wird nach dem Erzeugen von **`pow.o`** (Objekt-Code) nicht mehr gebraucht und könnte gelöscht werden
- Viele (meist kommerzielle) Anbieter von Funktionsbibliotheken liefern dem Benutzer keinen Quellcode
- Vor-und Nachbedingungen in Header-Dateien sind die *einzigen* verfügbaren Information

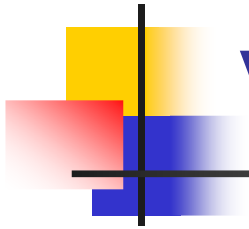
Modularisierung: Verfügbarkeit von Quellcode



“Open source” Software:

- Alle Quellen sind verfügbar
- nur das erlaubt die Weiterentwicklung durch Benutzer und andere interessierte Personen
- im akademischen Bereich ist “open source” Software weit verbreitet

Modularisierung: Verfügbarkeit von Quellcode

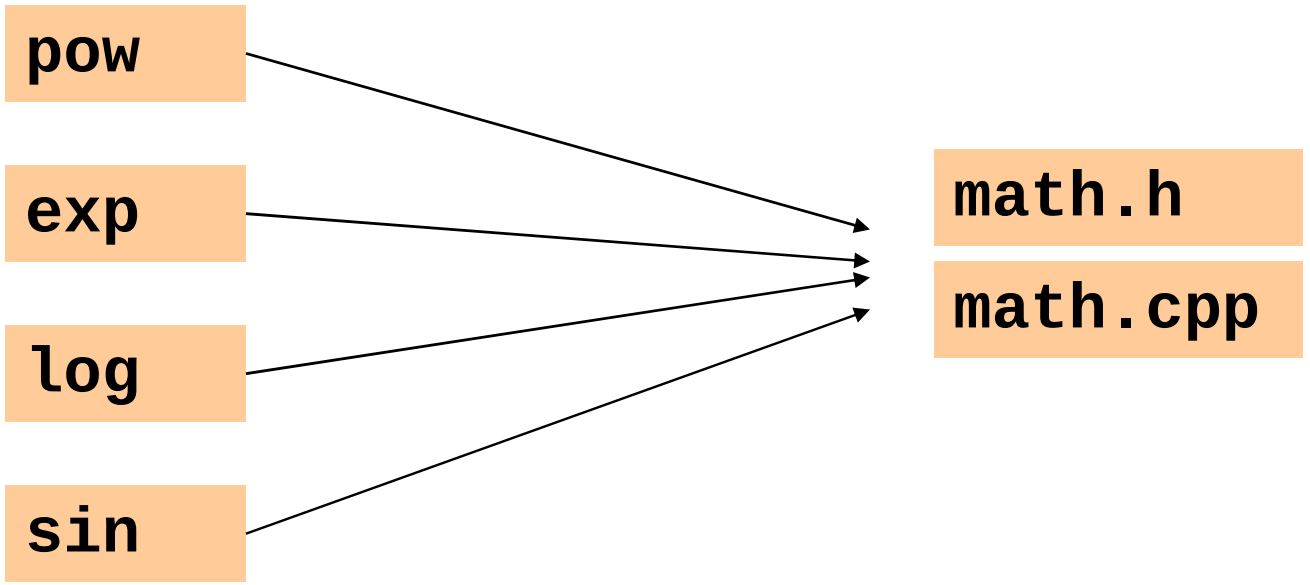


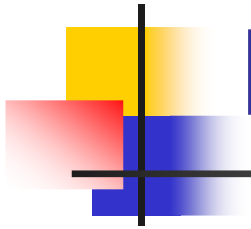
"Open source" Software:

- Alle Quellen sind verfügbar
- nur das erlaubt die Weiterentwicklung durch Benutzer und andere interessierte Personen
- im kommerziellen Bereich ist "open source" auf dem Vormarsch (trotz Microsoft…)
- Bekannteste "open source" Software: Das Betriebssystem **Linux**

Modularisierung: Bibliotheken

- Gruppierung ähnlicher Funktionen zu Bibliotheken



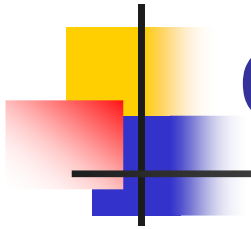


Modularisierung: Bibliotheken

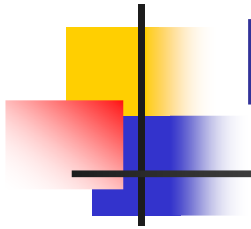
- Eigener Namensraum vemeidet Konflikte mit Benutzer-Funktionalität

```
// math.h
// A small library of mathematical functions.

namespace ifm {
  // PRE:  e >= 0 || b != 0.0
  // POST: return value is b^e
  double pow (double b, int e);
  ....
  double exp (double x);
  ...
}
```

Benutzen von Funktionen aus der Standardbibliothek



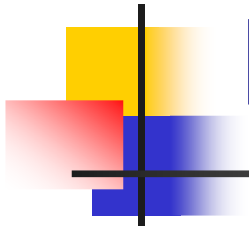
- vermeidet die Neuerfindung des Rades (z.B. gibt es **`std::pow, std::fill`**)
- führt auf einfache Weise zu interessanten und effizienten Programmen



Primzahltest mit `std::sqrt`

$n \geq 2$ ist Primzahl genau dann, wenn kein d in $\{2,\ldots,n-1\}$ ein Teiler von n ist.

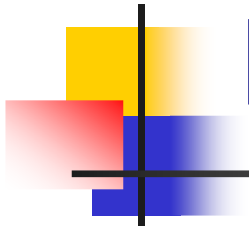
```
unsigned int d;
for (d = 2; n % d != 0; ++d);
```



Primzahltest mit `std::sqrt`

$n \geq 2$ ist Primzahl genau dann, wenn kein d in $\{2,\ldots,\sqrt{n}\}$ ein Teiler von n ist.

```
const unsigned int bound =
   (unsigned int)(std::sqrt(n));
unsigned int d;
for (d = 2; d <= bound && n % d != 0; ++d);
```



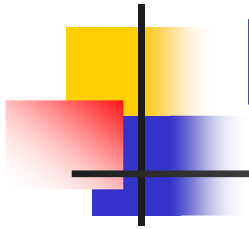
Primzahltest mit `std::sqrt`

$n \geq 2$ ist Primzahl genau dann, wenn kein d in $\{2,\ldots,\sqrt{n}\}$ ein Teiler von n ist.

```
const unsigned int bound =
   (unsigned int)(std::sqrt(n));
unsigned int d;
for (d = 2; d <= bound && n % d != 0; ++d);
```

Fall 1: Nach **`for`**-Anweisung gilt

`d <= bound` (das heisst d < n):



Primzahltest mit `std::sqrt`

$n \geq 2$ ist Primzahl genau dann, wenn kein d in $\{2,\ldots,\sqrt{n}\}$ ein Teiler von n ist.

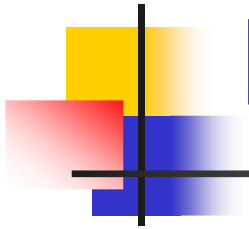
```
const unsigned int bound =
   (unsigned int)(std::sqrt(n));
unsigned int d;
for (d = 2; d <= bound && n % d != 0; ++d);
```

Fall 1: Nach **`for`**-Anweisung gilt

`d <= bound` (das heisst d < n):

Dann: `n % d == 0` , d ist echter Teiler, n keine Primzahl

Primzahltest mit `std::sqrt`

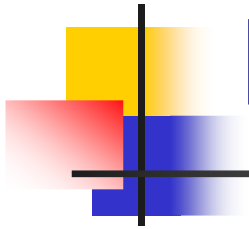


$n \geq 2$ ist Primzahl genau dann, wenn kein d in $\{2,\ldots,\sqrt{n}\}$ ein Teiler von n ist.

```
const unsigned int bound =
   (unsigned int)(std::sqrt(n));
unsigned int d;
for (d = 2; d <= bound && n % d != 0; ++d);
```

Fall 2: Nach **`for`**-Anweisung gilt

`d > bound` (das heisst d > √n):



Primzahltest mit `std::sqrt`

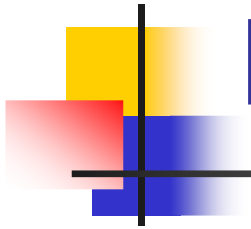
n ≥ *2* ist Primzahl genau dann, wenn kein *d* in {*2,…,√n* } ein Teiler von *n* ist.

```
const unsigned int bound =
   (unsigned int)(std::sqrt(n));
unsigned int d;
for (d = 2; d <= bound && n % d != 0; ++d);
```

Fall 2: Nach **`for`**-Anweisung gilt

`d > bound` (das heisst d > √n):

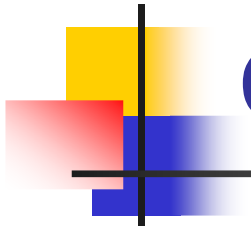
Dann: kein Teiler in {2,…,√n}, n ist Primzahl



Primzahltest mit `std::sqrt`

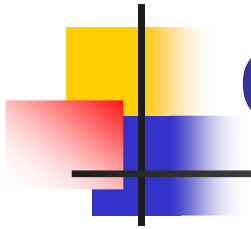
```
// Program: prime2.cpp
// Test if a given natural number is prime.

#include <iostream>
#include <cmath>

int main ()
{
  // Input
  unsigned int n;
  std::cout << "Test if n>1 is prime for n =? ";
  std::cin >> n;

  // Computation: test possible divisors d up to sqrt(n)
  const unsigned int bound = (unsigned int)(std::sqrt(n));
  unsigned int d;
  for (d = 2; d <= bound && n % d != 0; ++d);

  // Output
  if (d <= bound)
    // d is a divisor of n in {2,...,[sqrt(n)]}
    std::cout << n << " = " << d << " * " << n / d << ".\n";
  else
    // no proper divisor found
    std::cout << n << " is prime.\n";

  return 0;
}
```

Benutzen von Funktionen aus der Standardbibliothek



`prime2.cpp` *könnte* inkorrekt sein, falls z.B. **`std::sqrt(121)==10.998`**

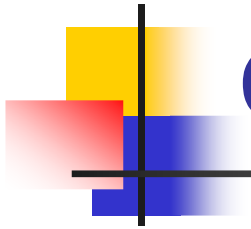
Benutzen von Funktionen aus der Standardbibliothek



`prime2.cpp` *könnte* inkorrekt sein, falls z.B. **`std::sqrt(121)==10.998`**

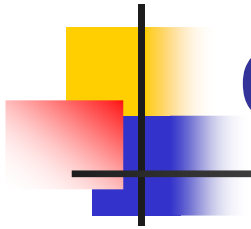
- **`bound == 10`**
- **`d == 11`** am Ende von **`for`**
- Ausgabe: **`121 is prime.`**

Benutzen von Funktionen aus der Standardbibliothek



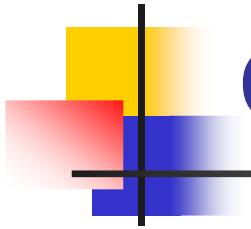
- Für **`std::sqrt`** garantiert der IEEE Standard 754 noch, dass der exakte Wert auf den nächsten darstellbaren Wert gerundet wird (wie bei +, -, *, /)

Benutzen von Funktionen aus der Standardbibliothek



- Für **`std::sqrt`** garantiert der IEEE Standard 754 noch, dass der exakte Wert auf den nächsten darstellbaren Wert gerundet wird (wie bei +, -, *, /)
- **Also: `std::sqrt(121)==11`**
- **`prime2.cpp`** ist korrekt unter dem IEEE Standard 754

Benutzen von Funktionen aus der Standardbibliothek



- Für andere mathematische Funktionen gibt der IEEE Standard 754 *keine* solchen Garantien, sie können also auch weniger genau sein!
- Gute Programme müssen darauf Rücksicht nehmen und, falls nötig, “Sicherheitsmassnahmen” einbauen.