15. Zeiger, Algorithmen, Iteratoren und Container II

Iteration mit Zeigern, Felder: Indizes vs. Zeiger, Felder und Funktionen, Zeiger und const, Algorithmen, Container und Traversierung, Vektor-Iteratoren, Typedef, Mengen, das Iterator-Konzept

Zur Erinnerung: Mit Zeigern übers Feld

Beispiel

```
int a[5] = {3, 4, 6, 1, 2};
for (int* p = a; p < a+5; ++p)
   std::cout << *p << ' '; // 3 4 6 1 2
```

Zur Erinnerung: Mit Zeigern übers Feld

Beispiel

```
int a[5] = {3, 4, 6, 1, 2};
for (int* p = a; p < a+5; ++p)
   std::cout << *p << ' '; // 3 4 6 1 2
```

- Ein Feld ist in einen Zeiger auf sein erstes Element konvertierbar.

Zur Erinnerung: Mit Zeigern übers Feld

Beispiel

```
int a[5] = {3, 4, 6, 1, 2};
for (int* p = a; p < a+5; ++p)
   std::cout << *p << ' '; // 3 4 6 1 2
```

- Ein Feld ist in einen Zeiger auf sein erstes Element konvertierbar.
- Zeiger kennen Arithmetik

Zur Erinnerung: Mit Zeigern übers Feld

Beispiel

```
int a[5] = {3, 4, 6, 1, 2};
for (int* p = a; p < a+5; ++p)
   std::cout << *p << ' '; // 3 4 6 1 2
```

- Ein Feld ist in einen Zeiger auf sein erstes Element konvertierbar.
- Zeiger kennen Arithmetik und Vergleiche.

Zur Erinnerung: Mit Zeigern übers Feld

Beispiel

```
int a[5] = {3, 4, 6, 1, 2};
for (int* p = a; p < a+5; ++p)
   std::cout << *p << ' '; // 3 4 6 1 2
```

- Ein Feld ist in einen Zeiger auf sein erstes Element konvertierbar.
- Zeiger kennen Arithmetik und Vergleiche.
- Zeiger können dereferenziert werden.

Zur Erinnerung: Mit Zeigern übers Feld

Beispiel

```
int a[5] = {3, 4, 6, 1, 2};
for (int* p = a; p < a+5; ++p)
   std::cout << *p << ' '; // 3 4 6 1 2
```

- Ein Feld ist in einen Zeiger auf sein erstes Element konvertierbar.
- Zeiger kennen Arithmetik und Vergleiche.
- Zeiger können dereferenziert werden.

$\Rightarrow$ Mit Zeigern kann man auf Feldern operieren.

Feldargumente: *Call by (const) reference*

```
void print_vector (const int (&v)[3]) {
  for (int i = 0; i<3 ; ++i) {
    std::cout << v[i] << " ";
  }
}
void make_null_vector (int (&v)[3]) {
  for (int i = 0; i<3 ; ++i) {
    v[i] = 0;
  }
}
```

Feldargumente: *Call by value*

```
void make_null_vector (int v[3]) {
  for (int i = 0; i<3 ; ++i) {
    v[i] = 0;
  }
}
...
```

Feldargumente: *Call by value (nicht wirklich...)*

```
void make_null_vector (int v[3]) {
  for (int i = 0; i<3 ; ++i) {
    v[i] = 0;
  }
}
...
int a[10];
make_null_vector (a); // setzt nur a[0], a[1], a[2]
```

Feldargumente: *Call by value (nicht wirklich...)*

```
void make_null_vector (int v[3]) {
  for (int i = 0; i<3 ; ++i) {
    v[i] = 0;
  }
}
...
int a[10];
make_null_vector (a); // setzt nur a[0], a[1], a[2]

int* b;
make_null_vector (b); // kein Feld bei b, Crash!
```

Feldargumente: *Call by value* gibt's nicht

- Formale Argumenttypen T`[n]` oder T`[]` (Feld über `T`) sind äquivalent zu $T*$ (Zeiger auf `T`)

Feldargumente: *Call by value* gibt's nicht

- Formale Argumenttypen T`[n]` oder T`[]` (Feld über `T`) sind äquivalent zu $T*$ (Zeiger auf `T`)
- Bei der Übergabe eines Feldes wird ein Zeiger auf das erste Element übergeben

Feldargumente: *Call by value* gibt's nicht

- Formale Argumenttypen *T* `[n]` oder *T* `[]` (Feld über `T`) sind äquivalent zu *T*$*$ (Zeiger auf `T`)
- Bei der Übergabe eines Feldes wird ein Zeiger auf das erste Element übergeben
- Längeninformation geht verloren

Feldargumente: *Call by value* gibt's nicht

- Formale Argumenttypen T`[n]` oder T`[]` (Feld über `T`) sind äquivalent zu $T*$ (Zeiger auf `T`)
- Bei der Übergabe eines Feldes wird ein Zeiger auf das erste Element übergeben
- Längeninformation geht verloren
- Funktion kann keinen Feldausschnitt verarbeiten (Beispiel: Suche eines Elements nur im hinteren Teil des Feldes)

Felder in Funktionen

Konvention der Standard-Bibliothek: Übergabe eines Feldes (oder eines Feldausschnitts) mit zwei Zeigern:

Felder in Funktionen

Konvention der Standard-Bibliothek: Übergabe eines Feldes (oder eines Feldausschnitts) mit zwei Zeigern:

- `begin`: Zeiger auf das erste Element
- `end`: Zeiger *hinter* das letzte Element

Felder in Funktionen

Konvention der Standard-Bibliothek: Übergabe eines Feldes (oder eines Feldausschnitts) mit zwei Zeigern:

- `begin`: Zeiger auf das erste Element
- `end`: Zeiger *hinter* das letzte Element
- `[begin, end)` bezeichnet die Elemente des Feldausschnitts

Felder in Funktionen

Konvention der Standard-Bibliothek: Übergabe eines Feldes (oder eines Feldausschnitts) mit zwei Zeigern:

- `begin`: Zeiger auf das erste Element
- `end`: Zeiger *hinter* das letzte Element
- `[begin, end)` bezeichnet die Elemente des Feldausschnitts
- *Gültiger* Bereich heisst: hier „leben“ wirklich Feldelemente

Felder in Funktionen

Konvention der Standard-Bibliothek: Übergabe eines Feldes (oder eines Feldausschnitts) mit zwei Zeigern:

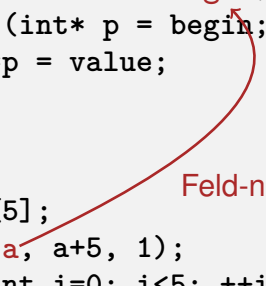
- `begin`: Zeiger auf das erste Element
- `end`: Zeiger *hinter* das letzte Element
- `[begin, end)` bezeichnet die Elemente des Feldausschnitts
- *Gültiger* Bereich heisst: hier „leben“ wirklich Feldelemente
- `[begin, end)` ist leer, wenn `begin == end`

Felder in (mutierenden) Funktionen: `fill`

```
// PRE: [begin, end) ist ein gueltiger Bereich
// POST: Jedes Element in [begin, end) wird auf value gesetzt
void fill (int* begin, int* end, int value) {
  for (int* p = begin; p != end; ++p)
     *p = value;
}
  ...

int a[5];
fill (a, a+5, 1);
for (int i=0; i<5; ++i)
  std::cout << a[i] << " ";  // 1 1 1 1 1
```

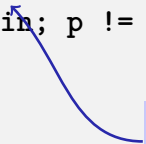
Felder in (mutierenden) Funktionen: `fill`

```
// PRE: [begin, end) ist ein gueltiger Bereich
// POST: Jedes Element in [begin, end) wird auf value gesetzt
void fill (int* begin, int* end, int value) {
  for (int* p = begin; p != end; ++p)
     *p = value;
}
  ...

int a[5];
fill (a, a+5, 1);
for (int i=0; i<5; ++i)
  std::cout << a[i] << " ";  // 1 1 1 1 1
```



Felder in (mutierenden) Funktionen: `fill`

```
// PRE: [begin, end) ist ein gueltiger Bereich
// POST: Jedes Element in [begin, end) wird auf value gesetzt
void fill (int* begin, int* end, int value) {
  for (int* p = begin; p != end; ++p)
    *p = value;
}
  ...

int a[5];
fill (a, a+5, 1);
for (int i=0; i<5; ++i)
  std::cout << a[i] << " ";  // 1 1 1 1 1
```



Erwartet Zeiger auf das erste Element eines Bereichs

Felder in (mutierenden) Funktionen: `fill`

```
// PRE: [begin, end) ist ein gueltiger Bereich
// POST: Jedes Element in [begin, end) wird auf value gesetzt
void fill (int* begin, int* end, int value) {
  for (int* p = begin; p != end; ++p)
     *p = value;
}
  ...

int a[5];
fill (a, a+5, 1);
for (int i=0; i<5; ++i)
  std::cout << a[i] << " ";
```

Erwartet Zeiger auf das erste Element eines Bereichs

Übergabe der Adresse (des ersten Elements) von a

Funktionen mit/ohne Effekten

- Zeiger können (wie auch Referenzen) für Funktionen mit Effekt verwendet werden. Beispiel: `fill`

Funktionen mit/ohne Effekten

- Zeiger können (wie auch Referenzen) für Funktionen mit Effekt verwendet werden. Beispiel: `fill`
- Aber viele Funktionen haben keinen Effekt, sie lesen Daten nur
- $\Rightarrow$ Verwendung von `const`

Funktionen mit/ohne Effekten

- Zeiger können (wie auch Referenzen) für Funktionen mit Effekt verwendet werden. Beispiel: `fill`
- Aber viele Funktionen haben keinen Effekt, sie lesen Daten nur
- $\Rightarrow$ Verwendung von `const`

Bisher, zum Beispiel:

```
int i = 0;
const int& j = i;
```

Funktionen mit/ohne Effekten

- Zeiger können (wie auch Referenzen) für Funktionen mit Effekt verwendet werden. Beispiel: `fill`
- Aber viele Funktionen haben keinen Effekt, sie lesen Daten nur
- $\Rightarrow$ Verwendung von `const`

Bisher, zum Beispiel:

```
int i = 0;
const int& j = i;

const int zero = 0;
const int& nil = zero;
```

Positionierung von Const

const T ist äquivalent zu *T const* und kann auch so geschrieben werden

```
const int zero = ...   ⟺   int const zero = ...
const int& nil = ...   ⟺   int const& nil = ...
```

Const und Zeiger

Lies Deklaration von rechts nach links

```
int const a;
```

`a` ist eine konstante Ganzzahl

Const und Zeiger

Lies Deklaration von rechts nach links

`int const a;`	`a` ist eine konstante Ganzzahl
`int const* a;`	`a` ist ein Zeiger auf eine konstante Ganzzahl

Const und Zeiger

Lies Deklaration von rechts nach links

`int const a;`	`a` ist eine konstante Ganzzahl
`int const* a;`	`a` ist ein Zeiger auf eine konstante Ganzzahl
`int* const a;`	`a` ist ein konstanter Zeiger auf eine Ganzzahl

Const und Zeiger

Lies Deklaration von rechts nach links

`int const a;`	`a` ist eine konstante Ganzzahl
`int const* a;`	`a` ist ein Zeiger auf eine konstante Ganzzahl
`int* const a;`	`a` ist ein konstanter Zeiger auf eine Ganzzahl
`int const* const a;`	`a` ist ein konstanter Zeiger auf eine konstante Ganzzahl

Nicht-mutierende Funktionen: `min`

```
// PRE: [begin, end) is a valid and nonempty range
// POST: the smallest value in [begin, end) is returned
int min (int* begin, int* end)
{
    assert (begin != end);
    int m = *begin; // current minimum candidate
    for (int* p = ++begin; p != end; ++p)
        if (*p < m) m = *p;
    return m;
}
```

Nicht-mutierende Funktionen: `min`

```
// PRE: [begin, end) is a valid and nonempty range
// POST: the smallest value in [begin, end) is returned
int min (int* begin, int* end)
{
    assert (begin != end);
    int m = *begin; // current minimum candidate
    for (int* p = ++begin; p != end; ++p)
        if (*p < m) m = *p;
    return m;
}
```

- Kennzeichnung mit `const`

Nicht-mutierende Funktionen: `min`

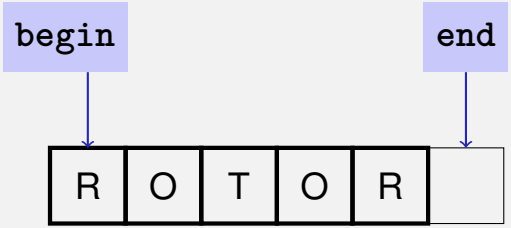
```
// PRE: [begin, end) is a valid and nonempty range
// POST: the smallest value in [begin, end) is returned
int min (const int* begin, const int* end)
{
    assert (begin != end);
    int m = *begin; // current minimum candidate
    for (const int* p = ++begin; p != end; ++p)
        if (*p < m) m = *p;
    return m;
}
```

`const` bezieht sich auf `int`, nicht auf den Zeiger.

- Kennzeichnung mit `const`

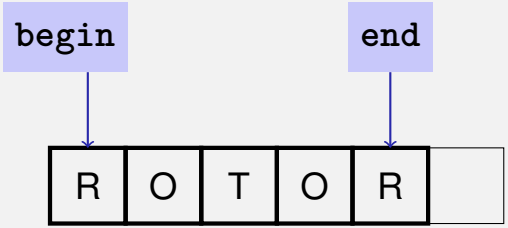
Wow – Palindrome!

```
// PRE: [begin end) is a valid range of characters
// POST: returns true if the range forms a palindrome
bool is_palindrome (const char* begin, const char* end) {
  while (begin < end)
    if (*(begin++) != *(--end)) return false;
  return true;
}
```



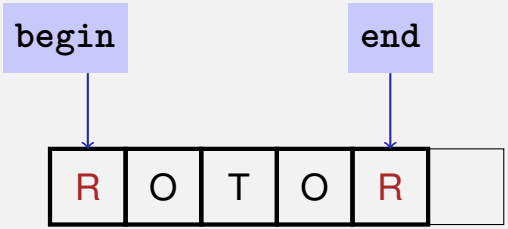
Wow – Palindrome!

```
// PRE: [begin end) is a valid range of characters
// POST: returns true if the range forms a palindrome
bool is_palindrome (const char* begin, const char* end) {
  while (begin < end)
    if (*(begin++) != *(--end)) return false;
  return true;
}
```



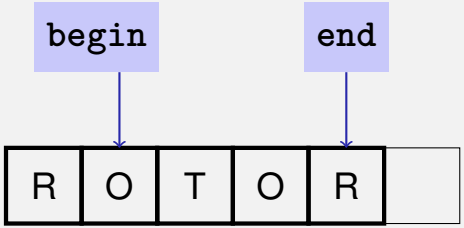
Wow – Palindrome!

```
// PRE: [begin end) is a valid range of characters
// POST: returns true if the range forms a palindrome
bool is_palindrome (const char* begin, const char* end) {
  while (begin < end)
    if (*(begin++) != *(--end)) return false;
  return true;
}
```



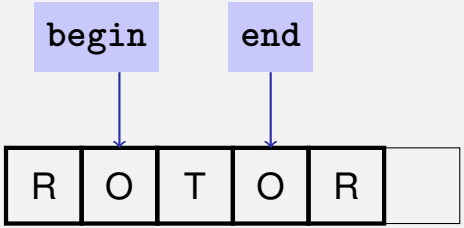
Wow – Palindrome!

```
// PRE: [begin end) is a valid range of characters
// POST: returns true if the range forms a palindrome
bool is_palindrome (const char* begin, const char* end) {
  while (begin < end)
    if (*(begin++) != *(--end)) return false;
  return true;
}
```



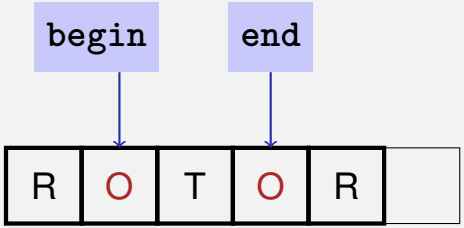
Wow – Palindrome!

```
// PRE: [begin end) is a valid range of characters
// POST: returns true if the range forms a palindrome
bool is_palindrome (const char* begin, const char* end) {
  while (begin < end)
    if (*(begin++) != *(--end)) return false;
  return true;
}
```



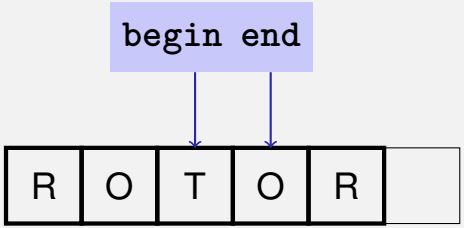
Wow – Palindrome!

```
// PRE: [begin end) is a valid range of characters
// POST: returns true if the range forms a palindrome
bool is_palindrome (const char* begin, const char* end) {
  while (begin < end)
    if (*(begin++) != *(--end)) return false;
  return true;
}
```



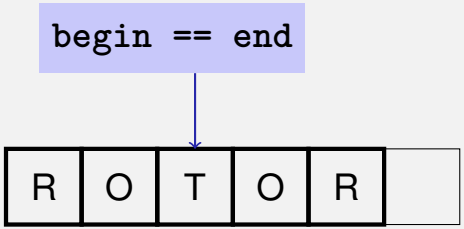
Wow – Palindrome!

```
// PRE: [begin end) is a valid range of characters
// POST: returns true if the range forms a palindrome
bool is_palindrome (const char* begin, const char* end) {
  while (begin < end)
    if (*(begin++) != *(--end)) return false;
  return true;
}
```



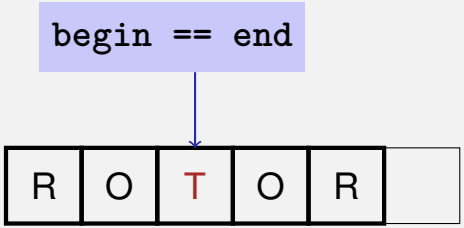
Wow – Palindrome!

```
// PRE: [begin end) is a valid range of characters
// POST: returns true if the range forms a palindrome
bool is_palindrome (const char* begin, const char* end) {
  while (begin < end)
    if (*(begin++) != *(--end)) return false;
  return true;
}
```



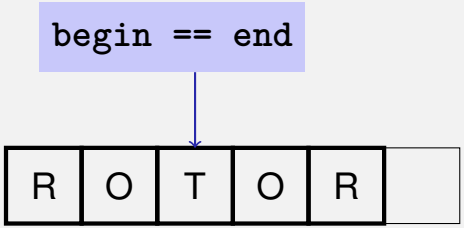
Wow – Palindrome!

```
// PRE: [begin end) is a valid range of characters
// POST: returns true if the range forms a palindrome
bool is_palindrome (const char* begin, const char* end) {
  while (begin < end)
    if (*(begin++) != *(--end)) return false;
  return true;
}
```



Wow – Palindrome!

```
// PRE: [begin end) is a valid range of characters
// POST: returns true if the range forms a palindrome
bool is_palindrome (const char* begin, const char* end) {
  while (begin < end)
    if (*(begin++) != *(--end)) return false;
  return true;
}
```



Algorithmen

Für viele alltägliche Probleme existieren vorgefertigte Lösungen in der Standardbibliothek.

Beispiel: Füllen eines Feldes

```
#include <algorithm> // needed for std::fill
...

int a[5];
std::fill (a, a+5, 1);

for (int i=0; i<5; ++i)
    std::cout << a[i] << " "; // 1 1 1 1 1
```

Algorithmen

Die gleichen vorgefertigten Algorithmen funktionieren für viele verschiedene Datentypen.

Beispiel: Füllen eines Feldes

```
#include <algorithm> // needed for std::fill
...

char c[3];
std::fill (c, c+3, '!');

for (int i=0; i<3; ++i)
    std::cout << c[i]; // !!!
```

Exkurs: Templates

Beispiel: `fill` mit Templates

```
template <typename T>
void fill (T* begin, T* end, T value) {
    for (T* p = begin; p != end; ++p)
        *p = value;
}
int a[5];
fill (a, a+5, 1);   // 1 1 1 1 1

char c[3];
fill (c, c+3, '!'); // !!!
```

Exkurs: Templates

Beispiel: `fill` mit Templates

```
template <typename T>
void fill (T* begin, T* end, T value) {
    for (T* p = begin; p != end; ++p)
        *p = value;
}
int a[5];
fill (a, a+5, 1);   // 1 1 1 1 1

char c[3];
fill (c, c+3, '!'); // !!!
```

Die eckigen Klammern kennen wir schon von `std::vector<int>`. Vektoren sind auch als Templates realisiert.

Exkurs: Templates

Beispiel: `fill` mit Templates

```
template <typename T>
void fill (T* begin, T* end, T value) {
    for (T* p = begin; p != end; ++p)
        *p = value;
}
int a[5];
fill (a, a+5, 1);   // 1 1 1 1 1

char c[3];
fill (c, c+3, '!'); // !!!
```

Die eckigen Klammern kennen wir schon von `std::vector<int>`. Vektoren sind auch als Templates realisiert.

Auch `std::fill` ist als Template realisiert!

Container und Traversierung

- **Container:** Behälter (Feld, Vektor,...) für Elemente

Container und Traversierung

- **Container:** Behälter (Feld, Vektor,...) für Elemente
- **Traversierung:** Durchlaufen eines Containers

Container und Traversierung

- **Container:** Behälter (Feld, Vektor,...) für Elemente
- **Traversierung:** Durchlaufen eines Containers
  - Initialisierung der Elemente (`fill`)

Container und Traversierung

- **Container:** Behälter (Feld, Vektor,...) für Elemente
- **Traversierung:** Durchlaufen eines Containers
  - Initialisierung der Elemente (`fill`)
  - Suchen des kleinsten Elements (`min`)

Container und Traversierung

- **Container:** Behälter (Feld, Vektor,...) für Elemente
- **Traversierung:** Durchlaufen eines Containers
  - Initialisierung der Elemente (`fill`)
  - Suchen des kleinsten Elements (`min`)
  - Prüfen von Eigenschaften (`is_palindrome`)

Container und Traversierung

- **Container:** Behälter (Feld, Vektor,...) für Elemente
- **Traversierung:** Durchlaufen eines Containers
  - Initialisierung der Elemente (`fill`)
  - Suchen des kleinsten Elements (`min`)
  - Prüfen von Eigenschaften (`is_palindrome`)
  - ...

Container und Traversierung

- **Container:** Behälter (Feld, Vektor,...) für Elemente
- **Traversierung:** Durchlaufen eines Containers
  - Initialisierung der Elemente (`fill`)
  - Suchen des kleinsten Elements (`min`)
  - Prüfen von Eigenschaften (`is_palindrome`)
  - ...
- Es gibt noch viele andere Container (Mengen, Listen,...)

Werkzeuge zur Traversierung

- Felder: Indizes (wahlfrei) oder Zeiger (sequenziell)

Werkzeuge zur Traversierung

- Felder: Indizes (wahlfrei) oder Zeiger (sequenziell)
- Feld-Algorithmen (`std::`) benutzen Zeiger

```
int a[5];
std::fill (a, a+5, 1);   // 1 1 1 1 1
```

Werkzeuge zur Traversierung

- Felder: Indizes (wahlfrei) oder Zeiger (sequenziell)
- Feld-Algorithmen (`std::`) benutzen Zeiger

```
int a[5];
std::fill (a, a+5, 1);   // 1 1 1 1 1
```

- Wie traversiert man Vektoren und andere Container?

```
std::vector<int> v (5, 0); // 0 0 0 0 0
std::fill (?, ?, 1);   // 1 1 1 1 1
```

Vektoren: *too sexy for pointers*

- Unser `fill` mit Templates funktioniert für Vektoren nicht...

Vektoren: *too sexy for pointers*

- Unser `fill` mit Templates funktioniert für Vektoren nicht...
- ...und `std::fill` so auch nicht:

```
std::vector<int> v (5, 0);
std::fill (v, v+5, 1);   // Fehlermeldung des Compilers !
```

Vektoren: *too sexy for pointers*

- Unser `fill` mit Templates funktioniert für Vektoren nicht...
- ...und `std::fill` so auch nicht:

```
std::vector<int> v (5, 0);
std::fill (v, v+5, 1);   // Fehlermeldung des Compilers !
```

Vektoren sind was Besseres...

Vektoren: *too sexy for pointers*

- Unser `fill` mit Templates funktioniert für Vektoren nicht...
- ...und `std::fill` so auch nicht:

```
std::vector<int> v (5, 0);
std::fill (v, v+5, 1);   // Fehlermeldung des Compilers !
```

Vektoren sind was Besseres...

- Sie lassen sich weder in Zeiger konvertieren,...

Vektoren: *too sexy for pointers*

- Unser `fill` mit Templates funktioniert für Vektoren nicht...
- ...und `std::fill` so auch nicht:

```
std::vector<int> v (5, 0);
std::fill (v, v+5, 1);   // Fehlermeldung des Compilers !
```

Vektoren sind was Besseres...

- Sie lassen sich weder in Zeiger konvertieren,...
- ...noch mit Zeigern traversieren.

Vektoren: *too sexy for pointers*

- Unser `fill` mit Templates funktioniert für Vektoren nicht...
- ...und `std::fill` so auch nicht:

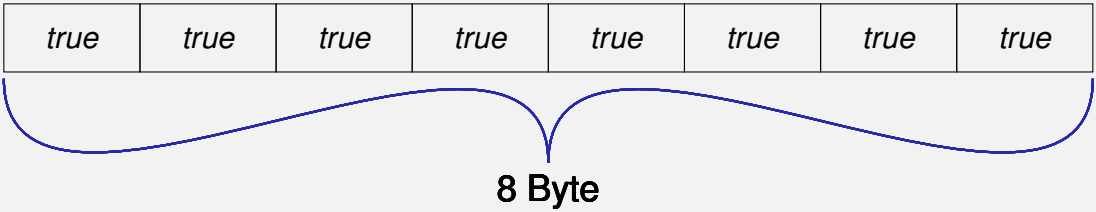
```
std::vector<int> v (5, 0);
std::fill (v, v+5, 1);   // Fehlermeldung des Compilers !
```

Vektoren sind was Besseres...

- Sie lassen sich weder in Zeiger konvertieren,...
- ...noch mit Zeigern traversieren.
- Das ist ihnen viel zu primitiv.☺

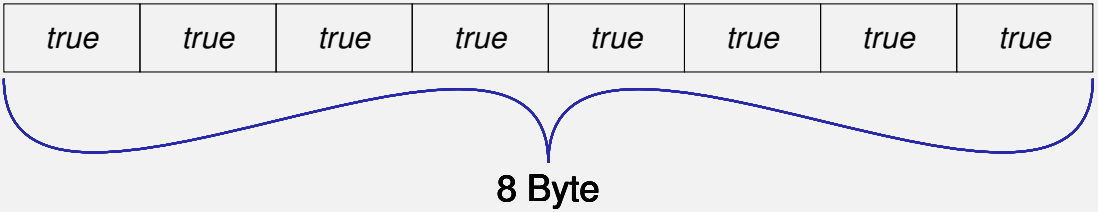
Auch im Speicher: Vektor $\neq$ Feld

```
bool a[8] = {true, true, true, true, true, true, true, true};
```

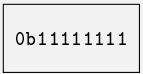


Auch im Speicher: Vektor $\neq$ Feld

```
bool a[8] = {true, true, true, true, true, true, true, true};
```



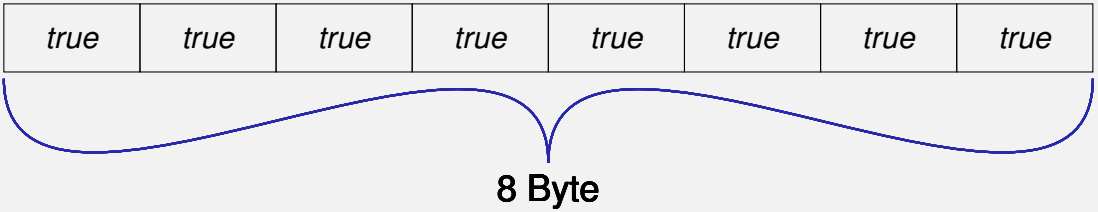

```
std::vector<bool> v (8, true);
```



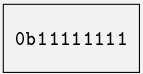
1 Byte

Auch im Speicher: Vektor $\neq$ Feld

```
bool a[8] = {true, true, true, true, true, true, true, true};
```




```
std::vector<bool> v (8, true);
```



1 Byte

`bool*`-Zeiger passt hier nicht, denn er läuft byteweise, nicht bitweise!

Vektor-Iteratoren

Iterator: ein „Zeiger“, der zum Container passt.

Vektor-Iteratoren

Iterator: ein „Zeiger“, der zum Container passt.

Beispiel: Füllen eines Vektors mit `std::fill` – so geht's!

```
#include <vector>
#include <algorithm> // needed for std::fill

...
std::vector<int> v(5, 0);
std::fill (v.begin(), v.end(), 1);
for (int i=0; i<5; ++i)
    std::cout << v[i] << " "; // 1 1 1 1 1
```

Vektor-Iteratoren

Für jeden Vektor sind zwei *Iterator-Typen* definiert.

- `std::vector<int>::const_iterator`

Vektor-Iteratoren

Für jeden Vektor sind zwei *Iterator-Typen* definiert.

- `std::vector<int>::const_iterator`
  - für nicht-mutierenden Zugriff

Vektor-Iteratoren

Für jeden Vektor sind zwei *Iterator-Typen* definiert.

- `std::vector<int>::const_iterator`
  - für nicht-mutierenden Zugriff
  - analog zu `const int*` für Felder

Vektor-Iteratoren

Für jeden Vektor sind zwei *Iterator-Typen* definiert.

- `std::vector<int>::const_iterator`
  - für nicht-mutierenden Zugriff
  - analog zu `const int*` für Felder
- `std::vector<int>::iterator`

Vektor-Iteratoren

Für jeden Vektor sind zwei *Iterator-Typen* definiert.

- `std::vector<int>::const_iterator`
  - für nicht-mutierenden Zugriff
  - analog zu `const int*` für Felder
- `std::vector<int>::iterator`
  - für mutierenden Zugriff

Vektor-Iteratoren

Für jeden Vektor sind zwei *Iterator-Typen* definiert.

- `std::vector<int>::const_iterator`
  - für nicht-mutierenden Zugriff
  - analog zu `const int*` für Felder
- `std::vector<int>::iterator`
  - für mutierenden Zugriff
  - analog zu `int*` für Felder

Vektor-Iteratoren: `begin()` und `end()`

- `v.begin()` zeigt auf das erste Element von `v`
- `v.end()` zeigt hinter das letzte Element von `v`

Vektor-Iteratoren: `begin()` und `end()`

- `v.begin()` zeigt auf das erste Element von `v`
- `v.end()` zeigt hinter das letzte Element von `v`

Vektor-Iteratoren: `begin()` und `end()`

- Damit können wir einen Vektor traversieren...

```
for (std::vector<int>::const_iterator it = v.begin();
                                      it != v.end(); ++it)
    std::cout << *it << " ";
```

- ...oder einen Vektor füllen.

```
std::fill (v.begin(), v.end(), 1);
```

Vektor-Iteratoren: `begin()` und `end()`

- Damit können wir einen Vektor traversieren...

```
for (std::vector<int>::const_iterator it = v.begin();
                                      it != v.end(); ++it)
    std::cout << *it << " ";
```

- ...oder einen Vektor füllen.

```
std::fill (v.begin(), v.end(), 1);
```

Typnamen in C++ können laaaaaaaang werden

- `std::vector<int>::const_iterator`

Typnamen in C++ können laaaaaaaang werden

- `std::vector<int>::const_iterator`
- Dann hilft die Deklaration eines *Typ-Alias* mit

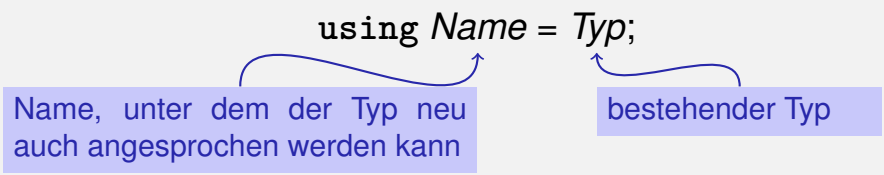
`using` *Name* = *Typ*;

Name, unter dem der Typ neu auch angesprochen werden kann

bestehender Typ

Typnamen in C++ können laaaaaaaang werden

- `std::vector<int>::const_iterator`
- Dann hilft die Deklaration eines *Typ-Alias* mit



Beispiele

```
using int_vec = std::vector<int>;
using Cvit = int_vec::const_iterator;
```

Vektor-Iteratoren funktionieren wie Zeiger

```
using Cvit = std::vector<int>::const_iterator;

std::vector<int> v(5, 0); // 0 0 0 0 0

// output all elements of a, using iteration
for (Cvit it = v.begin(); it != v.end(); ++it)
    std::cout << *it << " ";
```

Vektor-Iteratoren funktionieren wie Zeiger

```
using Cvit = std::vector<int>::const_iterator;

std::vector<int> v(5, 0); // 0 0 0 0 0

// output all elements of a, using iteration
for (Cvit it = v.begin(); it != v.end(); ++it)
    std::cout << *it << " ";
```

Vektor-Iteratoren funktionieren wie Zeiger

```
using Vit = std::vector<int>::iterator;

// manually set all elements to 1
for (Vit it = v.begin(); it != v.end(); ++it)
    *it = 1;

// output all elements again, using random access
for (int i=0; i<5; ++i)
    std::cout << v[i] << " ";
```

Vektor-Iteratoren funktionieren wie Zeiger

```
using Vit = std::vector<int>::iterator;

// manually set all elements to 1
for (Vit it = v.begin(); it != v.end(); ++it)
    *it = 1;

// output all elements again, using random access
for (int i=0; i<5; ++i)
    std::cout << v[i] << " ";
```

Inkrementieren des Iterators

Kurzschreibweise für `*(v.begin()+i)`

Andere Container: Mengen (Sets)

- Eine Menge ist eine ungeordnete Zusammenfassung von Elementen, wobei jedes Element nur einmal vorkommt.

$$\{1, 2, 1\} = \{1, 2\} = \{2, 1\}$$

Andere Container: Mengen (Sets)

- Eine Menge ist eine ungeordnete Zusammenfassung von Elementen, wobei jedes Element nur einmal vorkommt.

$$\{1, 2, 1\} = \{1, 2\} = \{2, 1\}$$

- C++: `std::set<T>` für eine Menge mit Elementen vom Typ `T`

Mengen: Beispiel einer Anwendung

- Stelle fest, ob ein gegebener Text ein Fragezeichen enthält und gib alle im Text vorkommenden *verschiedenen* Zeichen aus!

Buchstabensalat (1)

```
#include<set>
...
using Csit = std::set<char>::const_iterator;
...
std::string text =
"What are the distinct characters in this string?";

std::set<char> s (text.begin(),text.end());
```

Buchstabensalat (1)

```
#include<set>
...
using Csit = std::set<char>::const_iterator;
...
std::string text =
"What are the distinct characters in this string?";

std::set<char> s (text.begin(),text.end());
```

Menge wird mit *String-Iterator-Bereich* `[text.begin(), text.end())` initialisiert

Buchstabensalat (2)

```
// check whether text contains a question mark
if (std::find (s.begin(), s.end(), '?') != s.end())
    std::cout << "Good question!\n";

// output all distinct characters
for (Csit it = s.begin(); it != s.end(); ++it)
    std::cout << *it;
```

Buchstabensalat (2)

Suchalgorithmus, aufrufbar mit beliebigem Iterator-Bereich

```
// check whether text contains a question mark
if (std::find (s.begin(), s.end(), '?') != s.end())
    std::cout << "Good question!\n";

// output all distinct characters
for (Csit it = s.begin(); it != s.end(); ++it)
    std::cout << *it;
```

Buchstabensalat (2)

Suchalgorithmus, aufrufbar mit beliebigem Iterator-Bereich

```
// check whether text contains a question mark
if (std::find (s.begin(), s.end(), '?') != s.end())
    std::cout << "Good question!\n";

// output all distinct characters
for (Csit it = s.begin(); it != s.end(); ++it)
    std::cout << *it;
```

Ausgabe:

```
Good question!
?Wacdeghinrst
```

Mengen und Indizes?

- Kann man Mengen mit wahlfreiem Zugriff traversieren?

Mengen und Indizes?

- Kann man Mengen mit wahlfreiem Zugriff traversieren?

```
for (int i=0; i<s.size(); ++i)
    std::cout << s[i];
```

Mengen und Indizes?

- Kann man Mengen mit wahlfreiem Zugriff traversieren?

```
for (int i=0; i<s.size(); ++i)
    std::cout << s[i];
```

Fehlermeldung: no subscript operator

Mengen und Indizes?

- Kann man Mengen mit wahlfreiem Zugriff traversieren? Nein.

```
for (int i=0; i<s.size(); ++i)
    std::cout << s[i];
```

Fehlermeldung: no subscript operator

- Mengen sind ungeordnet.
  - Es gibt kein „i-tes Element“.

Mengen und Indizes?

- Kann man Mengen mit wahlfreiem Zugriff traversieren? Nein.

```
for (int i=0; i<s.size(); ++i)
    std::cout << s[i];
```


Fehlermeldung: no subscript operator

- Mengen sind ungeordnet.
  - Es gibt kein „i-tes Element“.
  - Iteratorvergleich `it != s.end()` geht, nicht aber `it < s.end()`!

Das Konzept der Iteratoren

C++kennt verschiedene Iterator-Typen

Das Konzept der Iteratoren

C++kennt verschiedene Iterator-Typen

- Jeder Container hat einen zugehörigen Iterator-Typ

Das Konzept der Iteratoren

C++kennt verschiedene Iterator-Typen

- Jeder Container hat einen zugehörigen Iterator-Typ
- Alle können dereferenzieren (`*it`) und traversieren (`++it`)

Das Konzept der Iteratoren

C++kennt verschiedene Iterator-Typen

- Jeder Container hat einen zugehörigen Iterator-Typ
- Alle können dereferenzieren (`*it`) und traversieren (`++it`)
- Manche können mehr, z.B. wahlfreien Zugriff (`it[k]`, oder äquivalent `*(it + k)`), rückwärts traversieren (`--it`),...

Das Konzept der Iteratoren

Jeder Container-Algorithmus der Standardbibliothek ist *generisch*.
Das heisst:

Das Konzept der Iteratoren

Jeder Container-Algorithmus der Standardbibliothek ist *generisch*. Das heisst:

- Der Container wird per Iterator-Bereich übergeben

Das Konzept der Iteratoren

Jeder Container-Algorithmus der Standardbibliothek ist *generisch*. Das heisst:

- Der Container wird per Iterator-Bereich übergeben
- Der Algorithmus funktioniert für alle Container, deren Iteratoren die Anforderungen des Algorithmus erfüllen

Das Konzept der Iteratoren

Jeder Container-Algorithmus der Standardbibliothek ist *generisch*. Das heisst:

- Der Container wird per Iterator-Bereich übergeben
- Der Algorithmus funktioniert für alle Container, deren Iteratoren die Anforderungen des Algorithmus erfüllen

- `std::find` erfordert z.B. nur `*` und `++`

Das Konzept der Iteratoren

Jeder Container-Algorithmus der Standardbibliothek ist *generisch*. Das heisst:

- Der Container wird per Iterator-Bereich übergeben
- Der Algorithmus funktioniert für alle Container, deren Iteratoren die Anforderungen des Algorithmus erfüllen
- `std::find` erfordert z.B. nur `*` und `++`
- Implementationsdetails des Containers sind nicht von Bedeutung

16. Rekursion 1

Mathematische Rekursion, Terminierung, der Aufrufstapel, Beispiele, Rekursion vs. Iteration

Mathematische Rekursion

- Viele mathematische Funktionen sind sehr natürlich rekursiv definierbar.

Mathematische Rekursion

- Viele mathematische Funktionen sind sehr natürlich rekursiv definierbar.
- Das heisst, die Funktion erscheint in ihrer eigenen Definition.

$$n! = \begin{cases} 1, & \text{falls } n \leq 1 \\ n \cdot (n-1)!, & \text{andernfalls} \end{cases}$$

Rekursion in C++: Genauso!

$$n! = \begin{cases} 1, & \text{falls } n \leq 1 \\ n \cdot (n-1)!, & \text{andernfalls} \end{cases}$$

```
// POST: return value is n!
unsigned int fac (unsigned int n)
{
  if (n <= 1)
    return 1;
  else
    return n * fac (n-1);
}
```

Unendliche Rekursion

- ist so schlecht wie eine Endlosschleife. . .

Unendliche Rekursion

- ist so schlecht wie eine Endlosschleife. . .
- . . . nur noch schlechter (“verbrennt” Zeit und Speicher)

Unendliche Rekursion

- ist so schlecht wie eine Endlosschleife...
- ...nur noch schlechter (“verbrennt” Zeit und Speicher)

```
void f()
{
  f(); // f() -> f() -> ... stack overflow
}
```

Unendliche Rekursion

- ist so schlecht wie eine Endlosschleife...
- ...nur noch schlechter (“verbrennt” Zeit und Speicher)

```
void f()
{
  f(); // f() -> f() -> ... stack overflow
}
```

Ein Euro ist ein Euro.

Wim Duisenberg, erster Präsident der EZB

Rekursive Funktionen: Terminierung

Wie bei Schleifen brauchen wir

- Fortschritt Richtung Terminierung

Rekursive Funktionen: Terminierung

Wie bei Schleifen brauchen wir

- Fortschritt Richtung Terminierung

`fac(n)`:
terminiert sofort für $n \leq 1$, andernfalls wird die Funktion rekursiv mit Argument < n aufgerufen.

Rekursive Funktionen: Terminierung

Wie bei Schleifen brauchen wir

- Fortschritt Richtung Terminierung

`fac(n)`:
terminiert sofort für $n \leq 1$, andernfalls wird die Funktion rekursiv mit Argument < n aufgerufen.

„n wird mit jedem Aufruf kleiner."

Rekursive Funktionen: Auswertung

Beispiel: `fac(4)`

```
// POST: return value is n!
unsigned int fac (unsigned int n)
{
  if (n <= 1) return 1;
  return n * fac(n-1); // n > 1
}
```

Aufruf von `fac(4)`

Rekursive Funktionen: Auswertung

Beispiel: `fac(4)`

```
// POST: return value is n!
unsigned int fac (unsigned int n)
{ // n = 4
  if (n <= 1) return 1;
  return n * fac(n-1); // n > 1
}
```

Initialisierung des formalen Arguments

Rekursive Funktionen: Auswertung

Beispiel: `fac(4)`

```
// POST: return value is n!
unsigned int fac (unsigned int n)
{ // n = 4
  if (n <= 1) return 1;
  return n * fac(n-1); // n > 1
}
```

Auswertung des Rückgabeausdrucks

Rekursive Funktionen: Auswertung

Beispiel: `fac(4)`

```
// POST: return value is n!
unsigned int fac (unsigned int n)
{ // n = 4
  if (n <= 1) return 1;
  return n * fac(n-1); // n > 1
}
```

Rekursiver Aufruf mit Argument $n - 1 == 3$

Rekursive Funktionen: Auswertung

Beispiel: `fac(4)`

```
// POST: return value is n!
unsigned int fac (unsigned int n)
{ // n = 3
  if (n <= 1) return 1;
  return n * fac(n-1); // n > 1
}
```

Initialisierung des formalen Arguments

Rekursive Funktionen: Auswertung

Beispiel: `fac(4)`

```
// POST: return value is n!
unsigned int fac (unsigned int n)
{ // n = 3
  if (n <= 1) return 1;
  return n * fac(n-1); // n > 1
}
```

Es gibt jetzt zwei n. Das von `fac(4)` und das von `fac(3)`

Initialisierung des formalen Arguments

Rekursive Funktionen: Auswertung

Beispiel: `fac(4)`

```
// POST: return value is n!
unsigned int fac (unsigned int n)
{
  if (n <= 1) return 1;
  return n * fac(n-1); // n > 1
}
```

Es wird mit dem n des aktuellen Aufrufs gearbeitet: $n = 3$

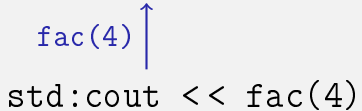
Initialisierung des formalen Arguments

Der Aufrufstapel

```
std:cout << fac(4)
```

Der Aufrufstapel

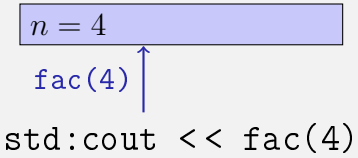
Bei jedem Funktionsaufruf:



Der Aufrufstapel

Bei jedem Funktionsaufruf:

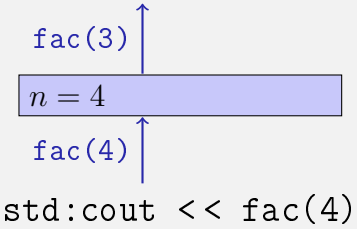
- Wert des Aufrufarguments kommt auf einen Stapel



Der Aufrufstapel

Bei jedem Funktionsaufruf:

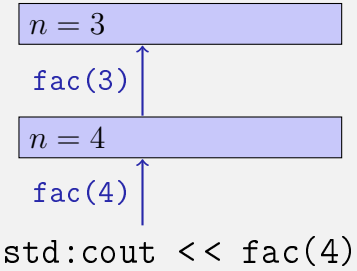
- Wert des Aufrufarguments kommt auf einen Stapel



Der Aufrufstapel

Bei jedem Funktionsaufruf:

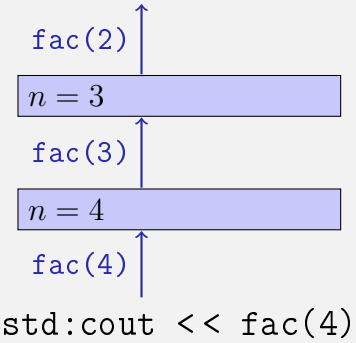
- Wert des Aufrufarguments kommt auf einen Stapel



Der Aufrufstapel

Bei jedem Funktionsaufruf:

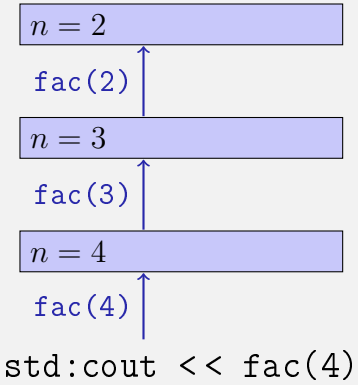
- Wert des Aufrufarguments kommt auf einen Stapel



Der Aufrufstapel

Bei jedem Funktionsaufruf:

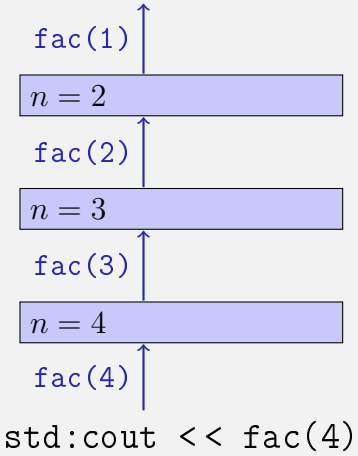
- Wert des Aufrufarguments kommt auf einen Stapel



Der Aufrufstapel

Bei jedem Funktionsaufruf:

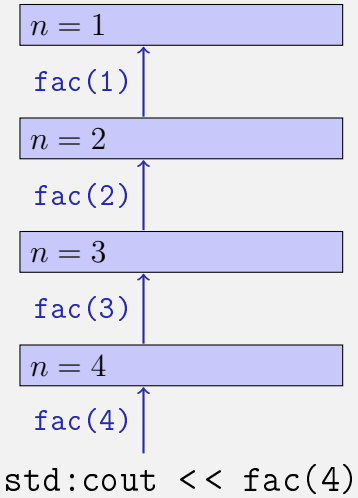
- Wert des Aufrufarguments kommt auf einen Stapel



Der Aufrufstapel

Bei jedem Funktionsaufruf:

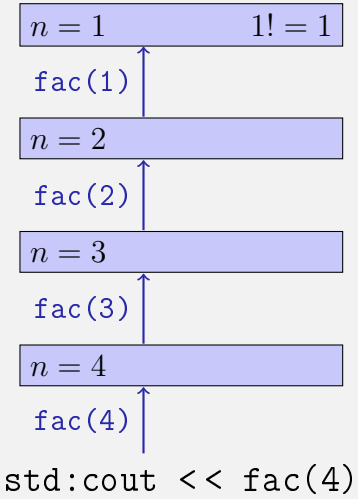
- Wert des Aufrufarguments kommt auf einen Stapel



Der Aufrufstapel

Bei jedem Funktionsaufruf:

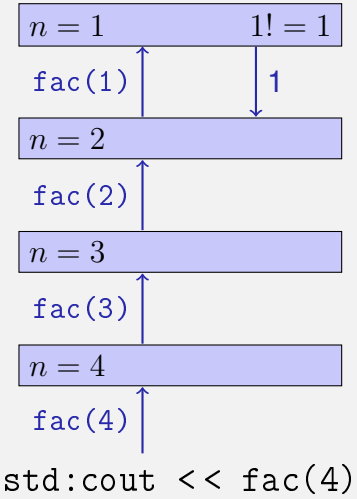
- Wert des Aufrufarguments kommt auf einen Stapel
- Es wird immer mit dem obersten Wert gearbeitet



Der Aufrufstapel

Bei jedem Funktionsaufruf:

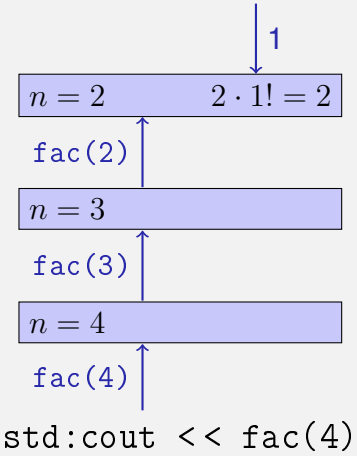
- Wert des Aufrufarguments kommt auf einen Stapel
- Es wird immer mit dem obersten Wert gearbeitet
- Am Ende des Aufrufs wird der oberste Wert wieder vom Stapel gelöscht



Der Aufrufstapel

Bei jedem Funktionsaufruf:

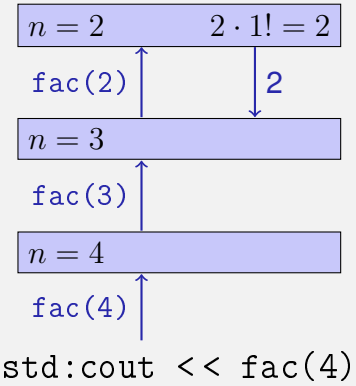
- Wert des Aufrufarguments kommt auf einen Stapel
- Es wird immer mit dem obersten Wert gearbeitet
- Am Ende des Aufrufs wird der oberste Wert wieder vom Stapel gelöscht



Der Aufrufstapel

Bei jedem Funktionsaufruf:

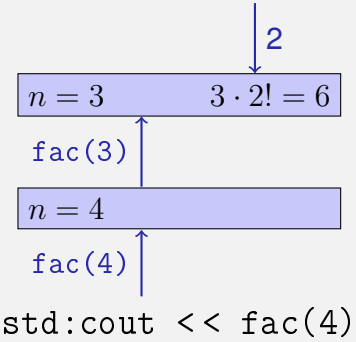
- Wert des Aufrufarguments kommt auf einen Stapel
- Es wird immer mit dem obersten Wert gearbeitet
- Am Ende des Aufrufs wird der oberste Wert wieder vom Stapel gelöscht



Der Aufrufstapel

Bei jedem Funktionsaufruf:

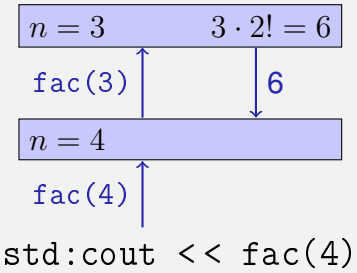
- Wert des Aufrufarguments kommt auf einen Stapel
- Es wird immer mit dem obersten Wert gearbeitet
- Am Ende des Aufrufs wird der oberste Wert wieder vom Stapel gelöscht



Der Aufrufstapel

Bei jedem Funktionsaufruf:

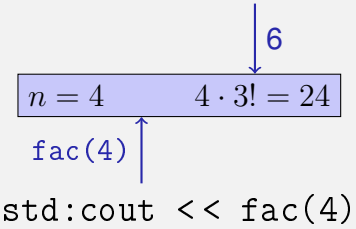
- Wert des Aufrufarguments kommt auf einen Stapel
- Es wird immer mit dem obersten Wert gearbeitet
- Am Ende des Aufrufs wird der oberste Wert wieder vom Stapel gelöscht



Der Aufrufstapel

Bei jedem Funktionsaufruf:

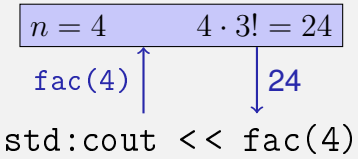
- Wert des Aufrufarguments kommt auf einen Stapel
- Es wird immer mit dem obersten Wert gearbeitet
- Am Ende des Aufrufs wird der oberste Wert wieder vom Stapel gelöscht



Der Aufrufstapel

Bei jedem Funktionsaufruf:

- Wert des Aufrufarguments kommt auf einen Stapel
- Es wird immer mit dem obersten Wert gearbeitet
- Am Ende des Aufrufs wird der oberste Wert wieder vom Stapel gelöscht



Der Aufrufstapel

Bei jedem Funktionsaufruf:

- Wert des Aufrufarguments kommt auf einen Stapel
- Es wird immer mit dem obersten Wert gearbeitet
- Am Ende des Aufrufs wird der oberste Wert wieder vom Stapel gelöscht

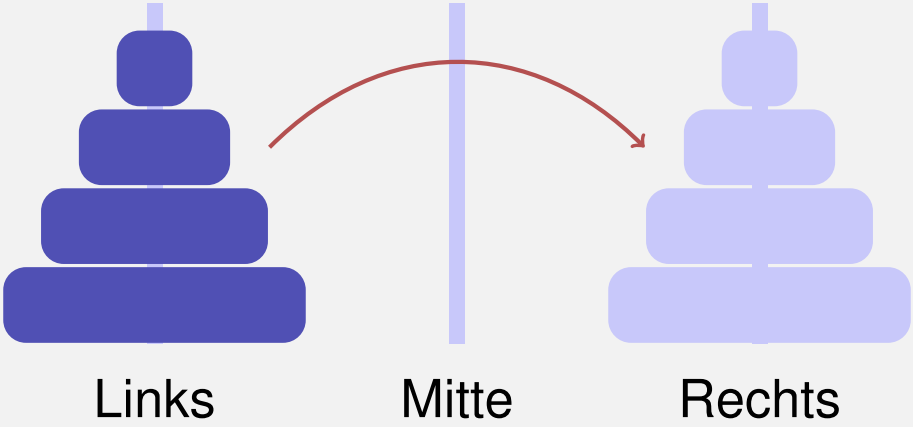
Die Macht der Rekursion

- Einige Probleme scheinen ohne Rekursion kaum lösbar zu sein. Mit Rekursion werden sie plötzlich einfacher lösbar.
- Beispiele: *Die Türme von Hanoi*, das n-Damen-Problem, Parsen von Ausdrücken, *Sudoku-Löser*, Umgekehrte Aus- oder Eingabe, Suchen in Bäumen, Divide-And-Conquer (z.B. Sortieren) $\rightarrow$ Engineering Tool III-IV

Experiment: Die Türme von Hanoi

Links Mitte Rechts

Experiment: Die Türme von Hanoi

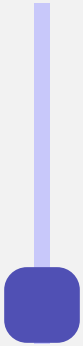


Die Türme von Hanoi - So gehts!

Links Mitte Rechts

Die Türme von Hanoi - So gehts!

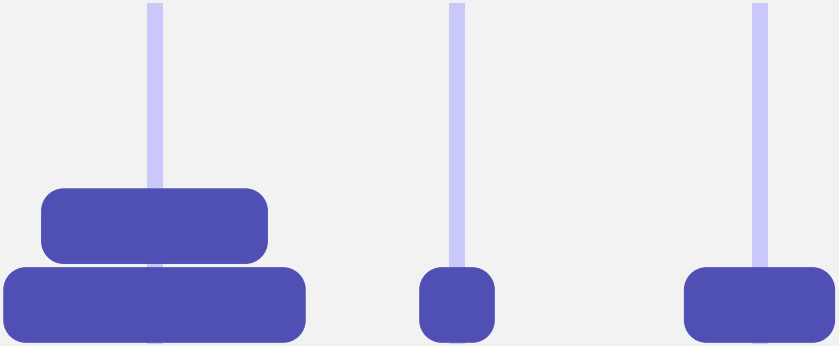
Links



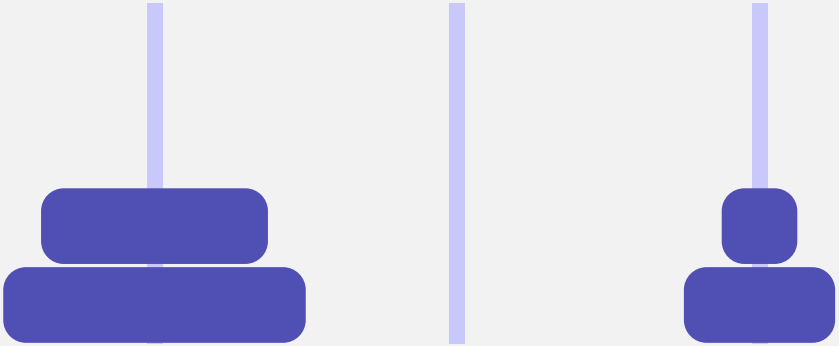
Mitte

Rechts

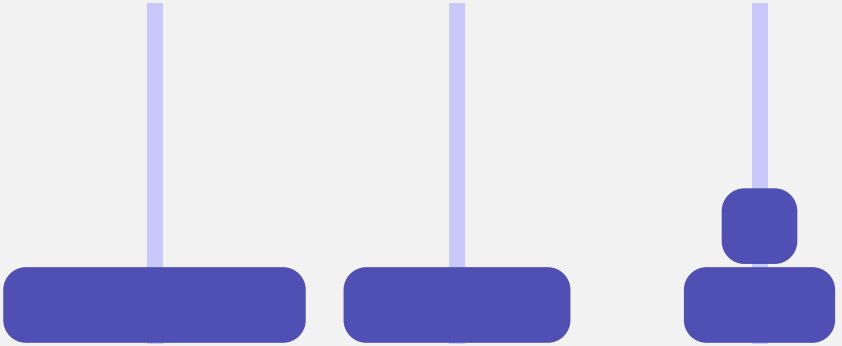
Die Türme von Hanoi - So gehts!



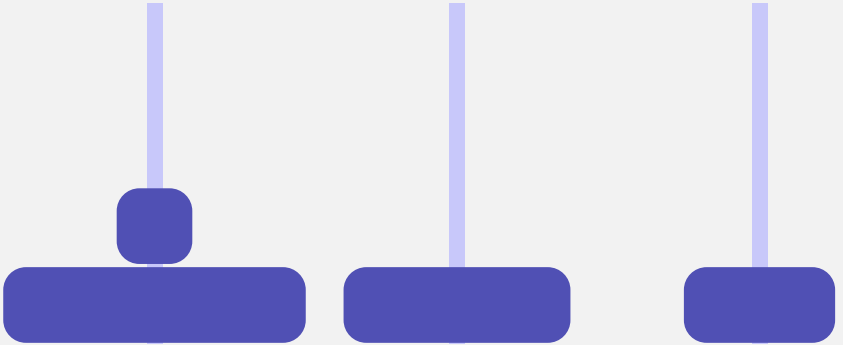
Die Türme von Hanoi - So gehts!



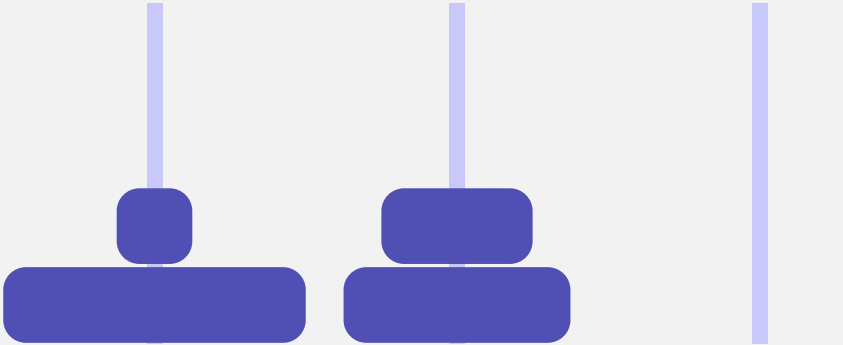
Die Türme von Hanoi - So gehts!



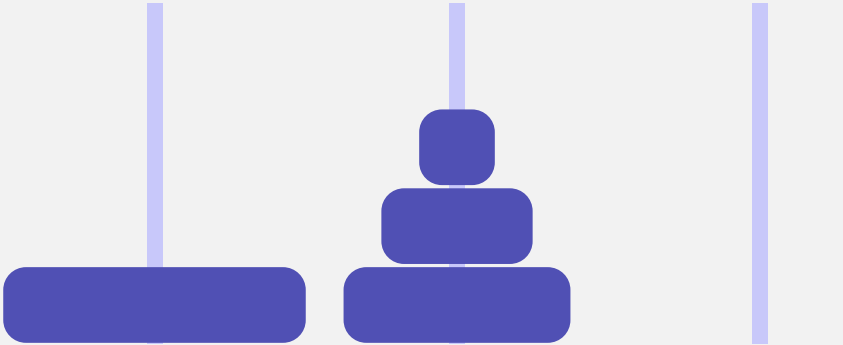
Die Türme von Hanoi - So gehts!



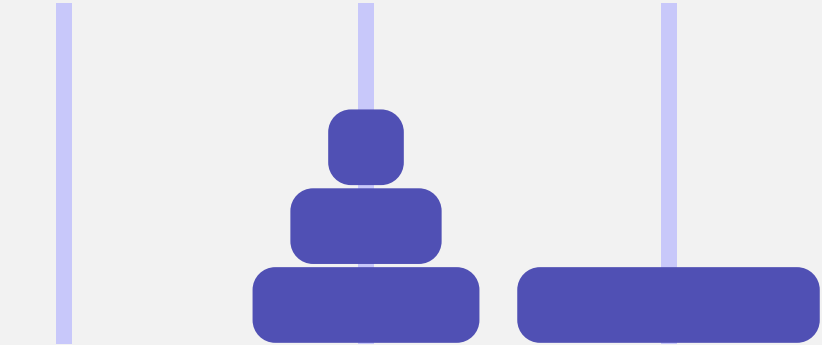
Die Türme von Hanoi - So gehts!



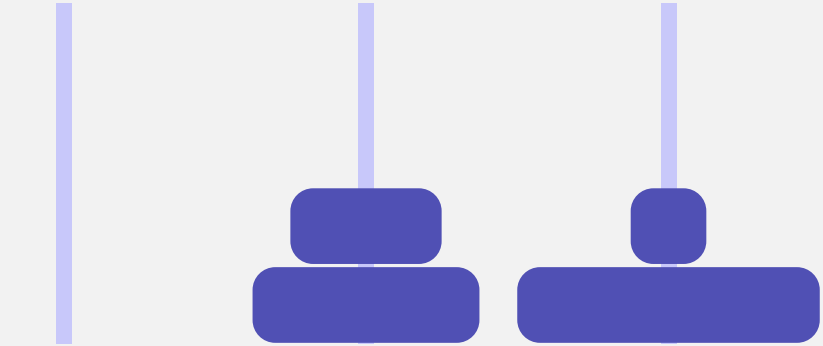
Die Türme von Hanoi - So gehts!



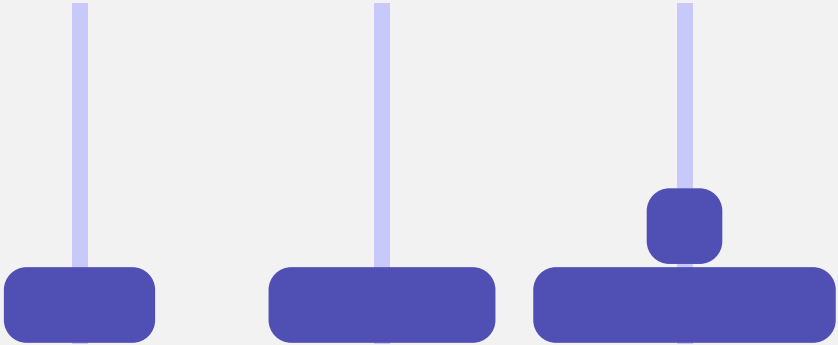
Die Türme von Hanoi - So gehts!



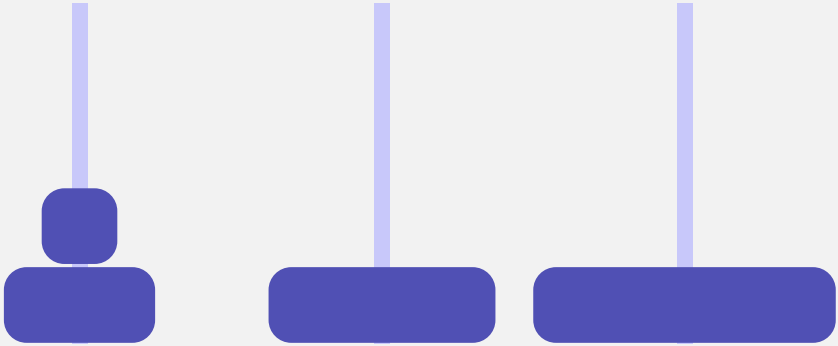
Die Türme von Hanoi - So gehts!



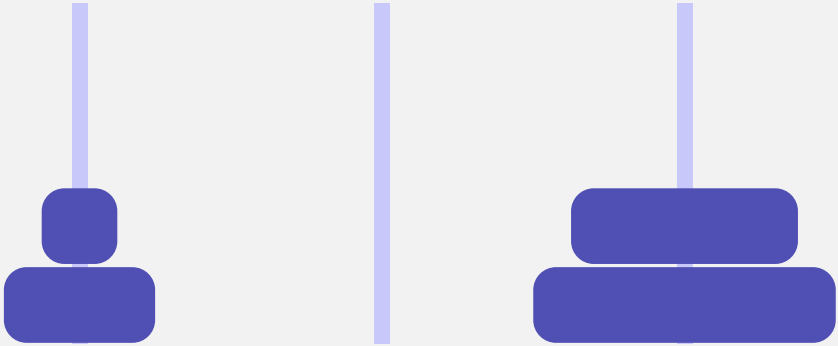
Die Türme von Hanoi - So gehts!



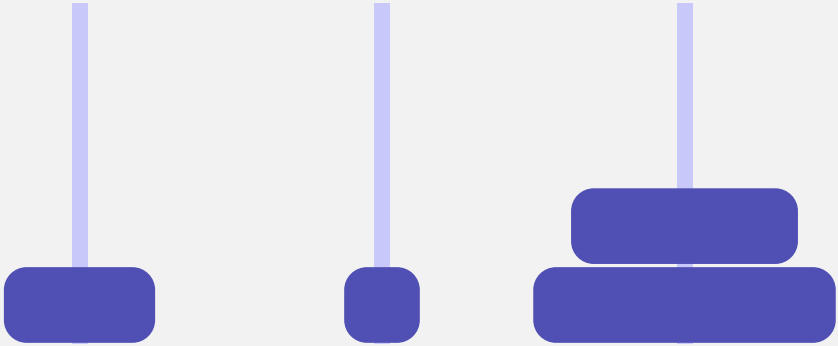
Die Türme von Hanoi - So gehts!



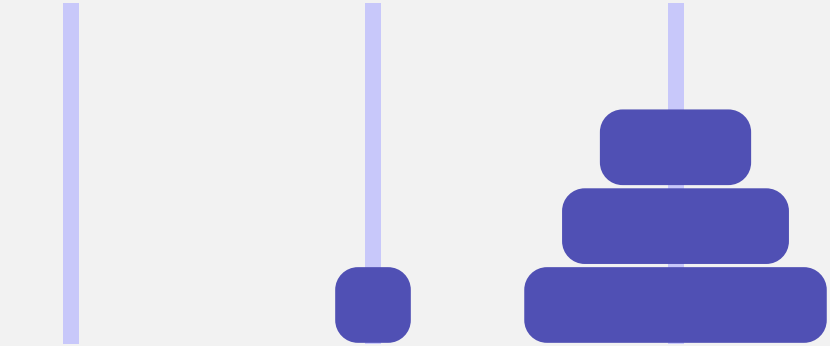
Die Türme von Hanoi - So gehts!



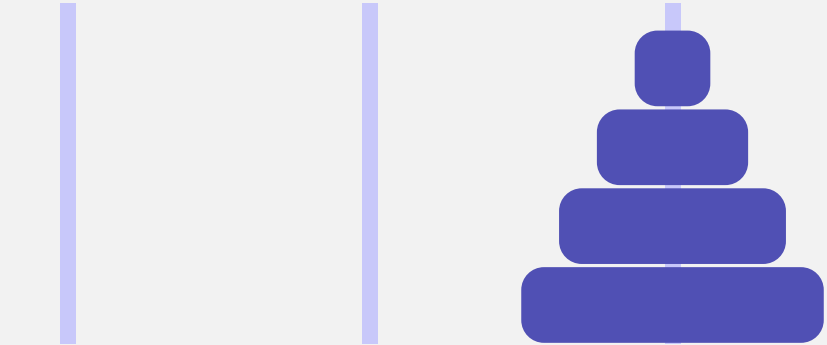
Die Türme von Hanoi - So gehts!



Die Türme von Hanoi - So gehts!



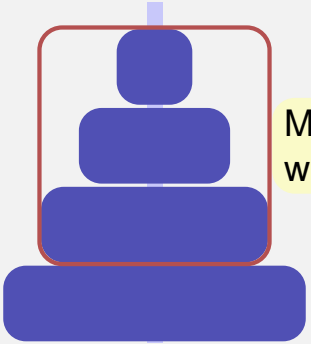
Die Türme von Hanoi - So gehts!



Die Türme von Hanoi - Rekursiver Lösungsansatz

Links Mitte Rechts

Die Türme von Hanoi - Rekursiver Lösungsansatz

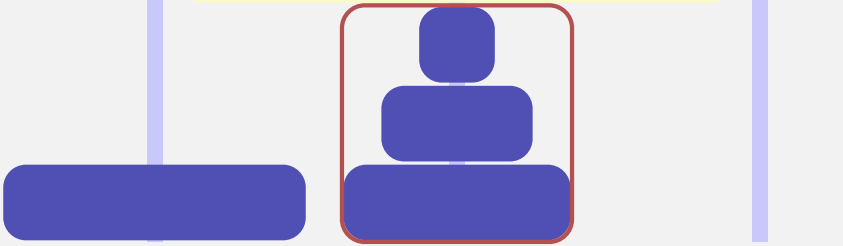


Mal *angenommen*, wir wüssten wie man ...

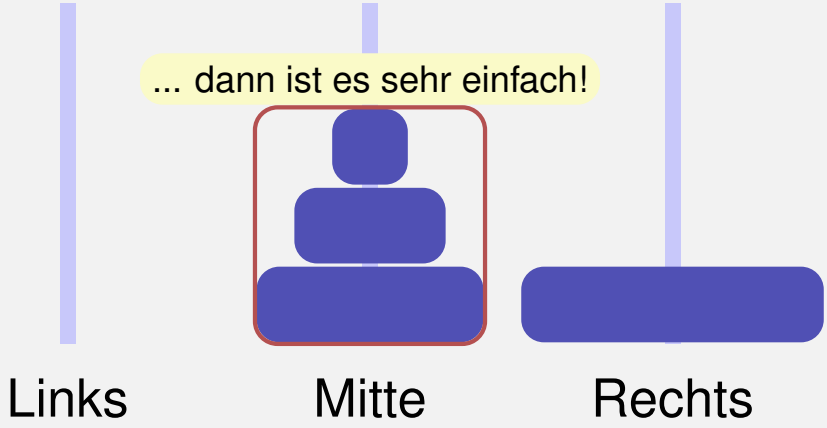
Links Mitte Rechts

Die Türme von Hanoi - Rekursiver Lösungsansatz

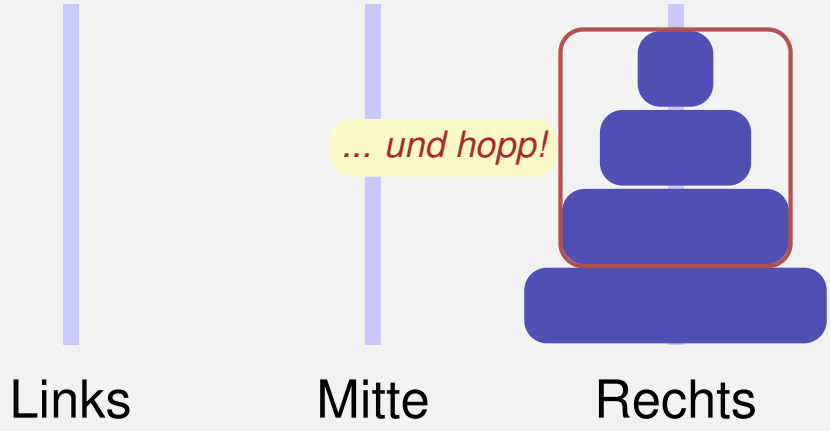
... *drei* Scheiben von einem Stapel zum anderen bringt ...



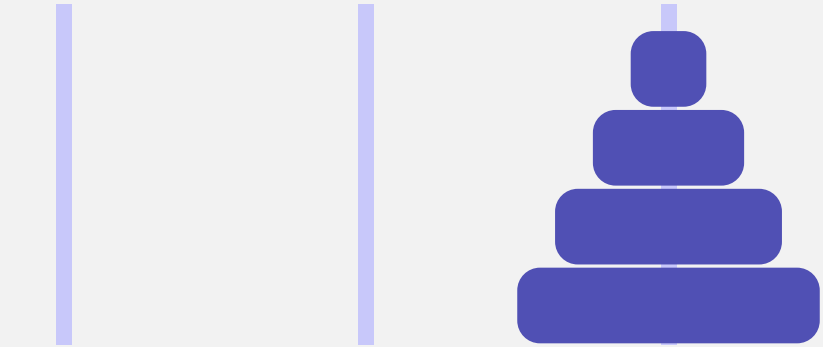
Die Türme von Hanoi - Rekursiver Lösungsansatz



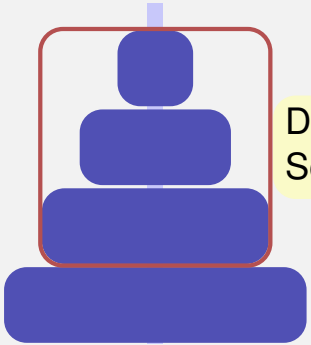
Die Türme von Hanoi - Rekursiver Lösungsansatz



Die Türme von Hanoi - Rekursiver Lösungsansatz



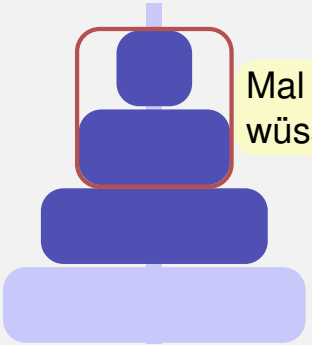
Die Türme von Hanoi - Rekursiver Lösungsansatz



Doch *wie* können wir drei Scheiben bewegen?

Links Mitte Rechts

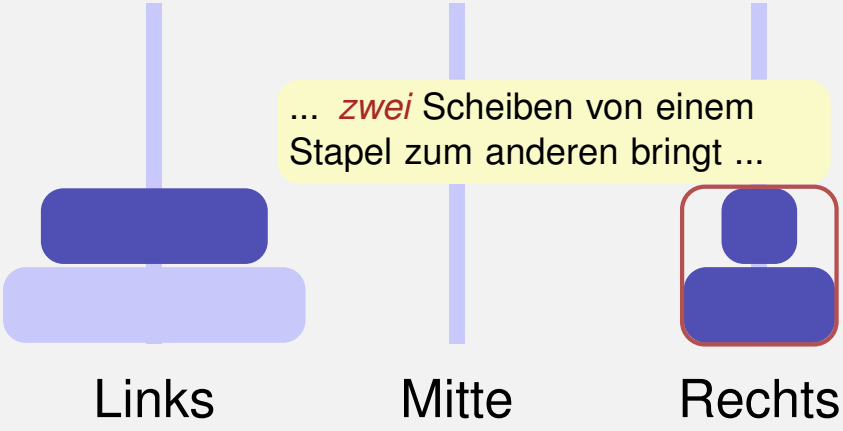
Die Türme von Hanoi - Rekursiver Lösungsansatz



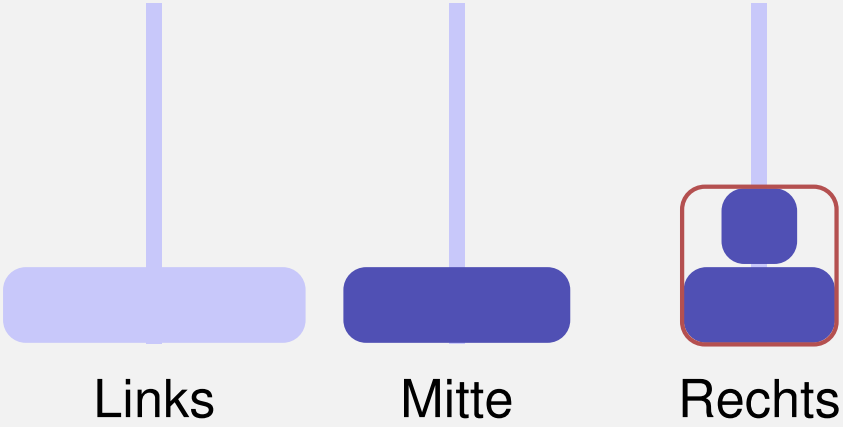
Mal *angenommen*, wir wüssten wie man ...

Links Mitte Rechts

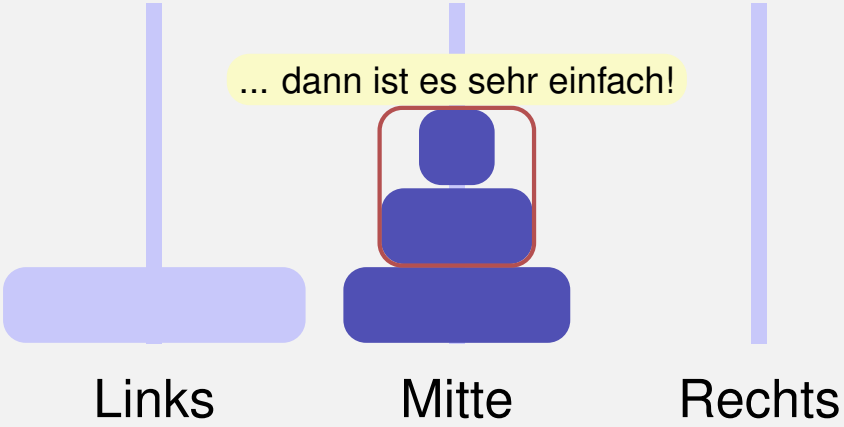
Die Türme von Hanoi - Rekursiver Lösungsansatz



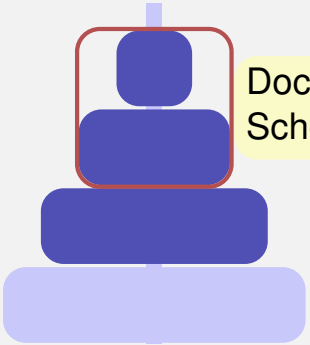
Die Türme von Hanoi - Rekursiver Lösungsansatz



Die Türme von Hanoi - Rekursiver Lösungsansatz



Die Türme von Hanoi - Rekursiver Lösungsansatz

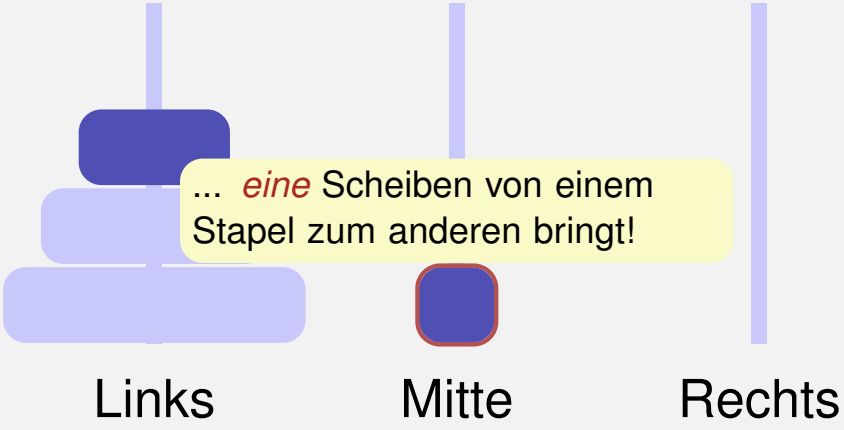


Doch *wie* können wir zwei Scheiben bewegen?

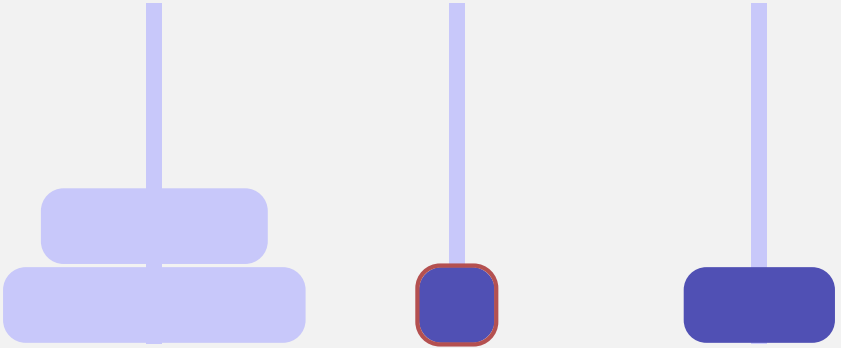
Links Mitte Rechts

Die Türme von Hanoi - Rekursiver Lösungsansatz

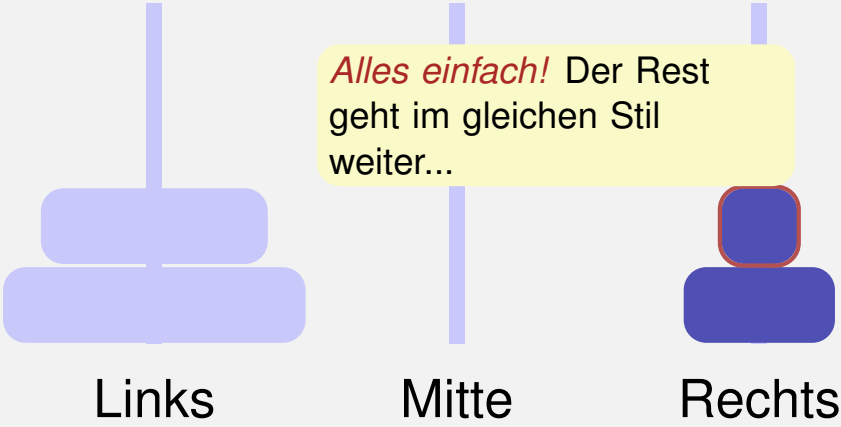
Die Türme von Hanoi - Rekursiver Lösungsansatz



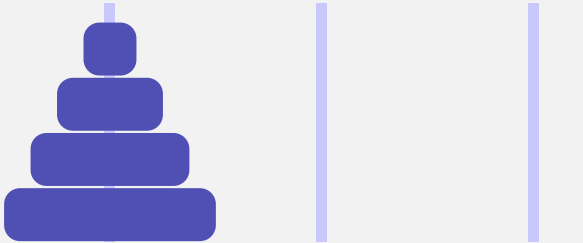
Die Türme von Hanoi - Rekursiver Lösungsansatz



Die Türme von Hanoi - Rekursiver Lösungsansatz



Die Türme von Hanoi - Code



Bewege 4 Scheiben von `left` nach `right` mit Hilfsstapel `middle`:

```
move(4,"left","middle","right")
```

Die Türme von Hanoi - Code

move(n**,** src**,** aux**,** dst**)** $\Rightarrow$

1. Bewege die obersten $n-1$ Scheiben von src nach aux mit Hilfsstapel dst:
   move($n-1$**,** src**,** dst**,** aux**);**
2. Bewege 1 Scheibe von src nach dst
   move(1, src**,** aux**,** dst**);**
3. Bewege die obersten $n-1$ Scheiben von aux nach dst mit Hilfsstapel src:
   move($n-1$**,** aux**,** src**,** dst**);**

Die Türme von Hanoi - Code

```
void move(int n, const string &src, const string &aux, const string &dst){
    if (n == 1) {
        // base case ('move' the disc)
        std::cout << src << " --> " << dst << std::endl;
    } else {
        // recursive case



    }
}
```

Die Türme von Hanoi - Code

```
void move(int n, const string &src, const string &aux, const string &dst){
    if (n == 1) {
        // base case ('move' the disc)
        std::cout << src << " --> " << dst << std::endl;
    } else {
        // recursive case
        move(n-1, src, dst, aux);


    }
}
```

Die Türme von Hanoi - Code

```
void move(int n, const string &src, const string &aux, const string &dst){
    if (n == 1) {
        // base case ('move' the disc)
        std::cout << src << " --> " << dst << std::endl;
    } else {
        // recursive case
        move(n-1, src, dst, aux);
        move(1, src, aux, dst);

    }
}
```

Die Türme von Hanoi - Code

```
void move(int n, const string &src, const string &aux, const string &dst){
    if (n == 1) {
        // base case ('move' the disc)
        std::cout << src << " --> " << dst << std::endl;
    } else {
        // recursive case
        move(n-1, src, dst, aux);
        move(1, src, aux, dst);
        move(n-1, aux, src, dst);
    }
}
```

Die Türme von Hanoi - Code

```
void move(int n, const string &src, const string &aux, const string &dst){
    if (n == 1) {
        // base case ('move' the disc)
        std::cout << src << " --> " << dst << std::endl;
    } else {
        // recursive case
        move(n-1, src, dst, aux);
        move(1, src, aux, dst);
        move(n-1, aux, src, dst);
    }
}
int main() {
    move(4, "left", "middle", "right");
    return 0;
}
```

Die Türme von Hanoi - Code Alternative

```
void move(int n, const string &src, const string &aux, const string &dst){
    // base case
    if (n == 0) return;

    // recursive case
    move(n-1, src, dst, aux);
    std::cout << src << " --> " << dst << "\n";
    move(n-1, aux, src, dst);
}


int main() {
    move(4, "left", "middle", "right");
    return 0;
}
```