1. Zeiger, Algorithmen, Iteratoren und Container II

Felder als Funktionsargumente, Iteratoren auf Vektoren, Container

Adress-Operator

Der Ausdruck

L-Wert vom Typ `T`

& lval

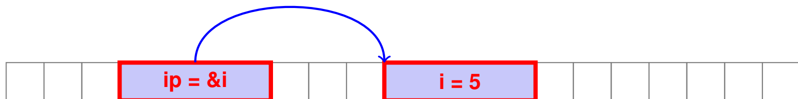
liefert als R-Wert einen *Zeiger* vom Typ *T** auf das Objekt an der Adresse von *lval*

Der Operator *&* heisst Adress-Operator.

Adress-Operator

Beispiel

```
int i = 5;
int* ip = &i;   // ip initialisiert
                // mit Adresse von i.
```



Dereferenz-Operator

Der Ausdruck

R-Wert vom Typ `T*`

$$*rval$$

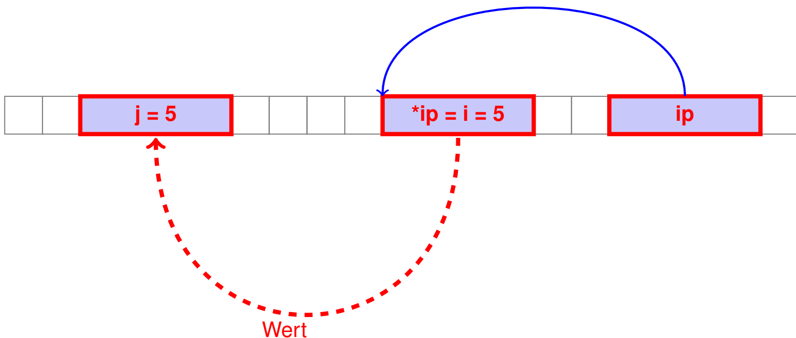
liefert als L-Wert den *Wert* des Objekts an der durch *rval* repräsentierten Adresse

Der Operator $*$ heisst Dereferenz-Operator.

Dereferenz-Operator

Beispiel

```
int i = 5;
int* ip = &i;  // ip initialisiert
               // mit Adresse von i.
int j = *ip;   // j == 5
```



Zeiger-Typen

Man zeigt nicht mit einem `double*` auf einen `int`!

Beispiele

```
int* i = ...;      // an Adresse i wohnt ein int...
double* j = i;     //...und an j ein double: Fehler!
```

Eselsbrücke

Die Deklaration

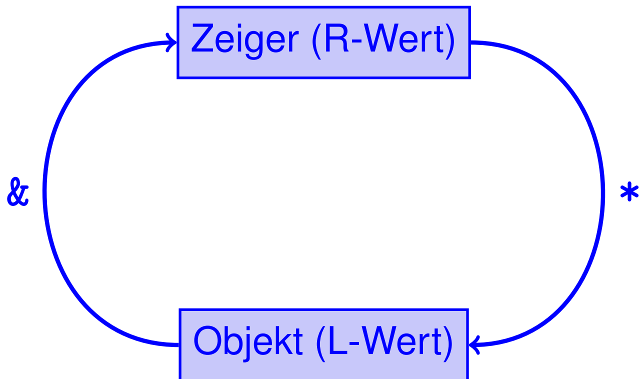
```
T* p;
```
p ist vom Typ “Zeiger auf T”

kann gelesen werden als

```
T *p;
```
*p ist vom Typ T

Obwohl das legal ist, schreiben wir es nicht so!

Adress- und Dereferenzoperator



Zeiger-Arithmetik: Zeiger plus `int`

- *ptr*: Zeiger auf $a[k]$ des Arrays a mit Länge n
- Wert von *expr*: ganze Zahl i mit $0 \leq k + i \leq n$

ptr + expr

ist Zeiger auf $a[k+i]$.

Für $k + i = n$ erhalten wir einen *past-the-end*-Zeiger, der nicht dereferenziert werden darf.

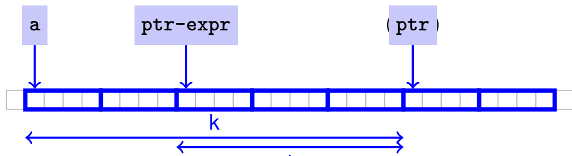
Zeiger-Arithmetik: Zeiger minus `int`

- Wenn *ptr* ein Zeiger auf das Element mit Index k in einem Array a der Länge n ist
- und der Wert von *expr* eine ganze Zahl i ist, $0 \leq k - i \leq n$,

dann liefert der Ausdruck

ptr - expr

einen Zeiger zum Element von a mit Index $k - i$.



Arrays und Funktionen - Ein Wunder?

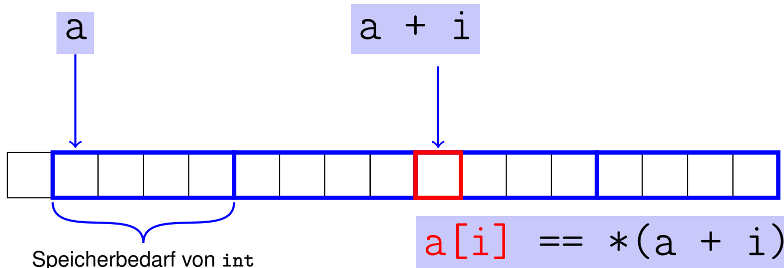
```
// PRE:  a[0],...,a[n-1] are elements of an array
// POST: a[i] is set to value, for 0 <= i < n
void fill_n (int a[], const int n, const int value) {
  for (int i=0; i<n; ++i)
    a[i] = value;
}

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

  return 0;
}
```

`int a[]` ist äquivalent zu `int* a`
Übergabe der *Adresse* von a

Wir wundern uns weiter...

```
// PRE: a[0],...,a[n−1] are elements of an array
// POST: a[i] is set to value, for 0 <= i < n
void fill_n (int* a, const int n, const int value) {
  for (int i=0; i<n; ++i)
    a[i]a[i] = value;
}
```

Was heisst das bei einem Zeiger?



Die Wahrheit über wahlfreien Zugriff

Der Ausdruck

Zeiger → *ptr* ; int → *expr*

ptr [expr]

ist äquivalent zu

**(ptr + expr)*

Beispiel

```
for (int i=0; i<n; ++i)
    a[i] = value;
```

äquivalent zu

```
for (int i=0; i<n; ++i)
    *(a+i) = value;
```

Konversion Feld ⇒ Zeiger

Wie kommt das Feld `a` in die Funktion
`fill_n (int* a, int n, int value)` ?

- Statisches Feld vom Typ $T[\mathrm{n}]$ ist konvertierbar nach T`*`

Beispiel

```
int a[5];
int* begin = a; // begin zeigt auf a[0]
```

- Längeninformation geht verloren („Felder sind primitiv”).

Zeigerwerte sind keine Ganzzahlen

- Adressen können als „Hausnummern des Speichers”, also als Zahlen interpretiert werden.
- Ganzzahl- und Zeigerarithmetik verhalten sich aber unterschiedlich.

  `ptr + 1` ist *nicht* die nächste Hausnummer, sondern die s-nächste, wobei s der Speicherbedarf eines Objekts des Typs ist, der `ptr` zugrundeliegt.

- Zeiger und Ganzzahlen sind nicht kompatibel:

```
int* ptr = 5; // Fehler: invalid conversion from int to int*
int a = ptr;  // Fehler: invalid conversion from int* to int
```

Null-Zeiger

- spezieller Zeigerwert, der angibt, dass noch auf kein Objekt gezeigt wird
- repräsentiert durch die ganze Zahl 0 (konvertierbar nach `T*`)

```
int* iptr = 0;
```

- kann nicht dereferenziert werden (prüfbar zur Laufzeit)
- zur Vermeidung undefinierten Verhaltens

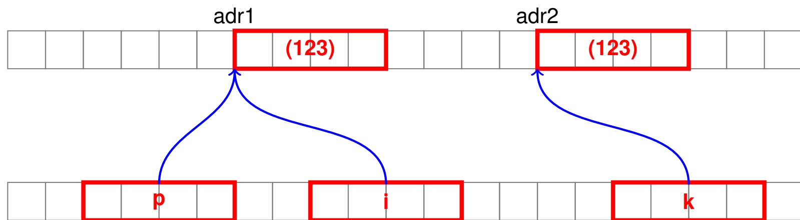
```
int* iptr; // iptr zeigt ‘‘ins Nirvana’’
int j = *iptr; // Illegale Adresse in *
```

Zeigervergleich

Zeiger können verglichen werden. Vergleich liefert als Ergebnis, ob die *Zeiger*werte (d.h. die repräsentierten Adressen) übereinstimmen.

```
int* p = ...;
int* i = p;
int* k = ...;
```

```
p == i; // true
p != k; // true
```



Zeigervergleiche

- Neben == und `!=` lassen sich auch

  <, <=, > und >=

  zum Vergleich von Zeigern verwenden
- Resultat des Vergleichs von Zeigern *p1* und *p2* ist nur gültig, wenn *p1* und *p2* auf Elemente desselben Feldes `a` zeigen.
- Der Vergleich liefert die Reihenfolge der beiden Elemente im Feld.

Beispiel Zeigervergleiche

```
// PRE: first zeigt auf den ersten Buchstaben, last auf den
//      letzten Buchstaben eines Feldes von Zeichen
// POST: gibt genau dann true zurueck, wenn der Bereich
//       von Zeichen ein Palindrom bildet
bool is_palindrome (const char* first, const char* last) {
  while (first < last) {
    if (*first != *last) return false;
    ++first; // eins vor
    --last;  // eins zurueck
  }
  return true;
}
```

Vorteil dieser Lösung

- Adressberechnung relativ zum Feldursprung entfällt

Zeigersubtraktion

- Wenn *p1* und *p2* auf Elemente desselben Arrays `a` mit Länge n zeigen
- und $0 \leq k_1, k_2 \leq n$ die Indizes der Elemente sind, auf die *p1* und *p2* zeigen, so gilt

p1 - p2 ist äquivalent zu k_1 - k_2

Nur gültig, wenn *p1* und *p2* ins gleiche Feld zeigen.

- Die Zeigerdifferenz beschreibt, „wie weit die Elemente voneinander entfernt sind”

Zeigeroperatoren

Beschreibung	Op	Stellig-keit	Prä-zedenz	Asso-ziativi-tät	Zuordnung
Subskript	`[]`	2	17	links	R-Werte → L-Wert
Dereferenzierung	`*`	1	16	rechts	R-Wert → L-Wert
Adresse	`&`	1	16	rechts	L-Wert → R-Wert

Präzedenzen und Assoziativitäten von `+`, `-`, `++` (etc.) wie in Kapitel 2

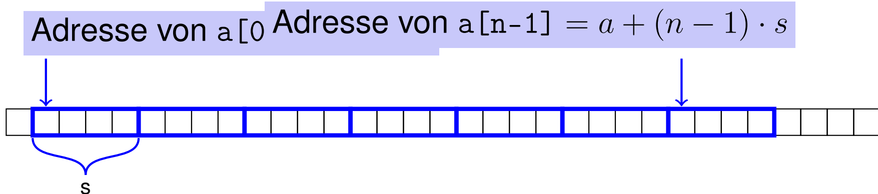
Warum Zeiger?

- Gegen die Verwendung von Zeigern spricht
  - Niedriges Abstraktionsniveau
  - Komplexität – schwierig zu verstehen
  - Fehleranfälligkeit – kleine Programmierfehler haben i.d.R. katastrophale Auswirkungen
- Aber
  - Zeiger erlauben effizienteren Zugriff
  - Zeiger erlauben dynamische Allokation
  - Operationen auf Zeigern sind die Iteratoren auf Containern

Traversieren von Feldern – Wahlfreier Zugriff

```
// PRE: a[0],...,a[n−1] are elements of an array
// POST: a[i] is set to value, for 0 <= i < n
void fill_n (int a[], const int n, const int value){
  for (int i=0; i<n; ++i)
    a[i] = value;
}
```

Berechnungsaufwand



⇒ Eine **Addition** und eine **Multiplikation** pro Element

Traversieren von Feldern – Natürliche Iteration

```
// PRE: [begin , end) is a valid range
// POST: *p is set to value , for p in [begin , end)
void fill (int* begin , int* end, const int value) {
   for (int* ptr = begin; ptr != end; ++ptr)
      *ptr = value;
}
```

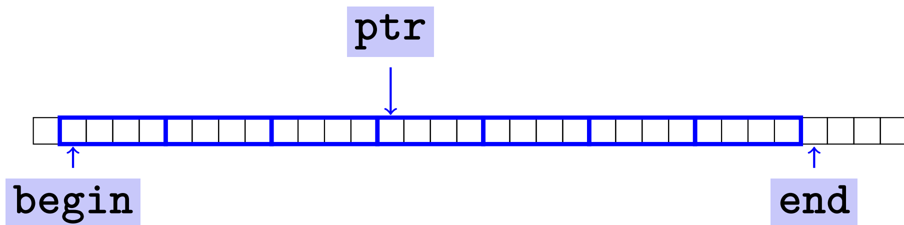
Neu: Übergabe des zu füllenden Bereichs mit Hilfe zweier Zeiger:

- **`begin`**: Zeiger auf das erste Element
- **`end`**: Zeiger *hinter* das letzte Element
- Das halboffene Intervall **`[begin, end)`** bezeichnet diesen Zeigerbereich.
- Gültiger Bereich heisst: unter diesen Adressen “leben” wirklich Feldelemente.

Traversieren von Feldern – Natürliche Iteration

```
// PRE: [begin , end) is a valid range
// POST: *p is set to value in [begin , end)
void fill (int* begin, int* end, const int value) {
   for (int* ptr = begin; ptr != end; ++ptr)
      *ptr = value;
}
```

Berechnungsaufwand



⇒ eine **Addition** pro Feldelement

Ein Buch lesen

Wahlfreier Zugriff:

- öffne Buch auf S.1
- Klappe Buch zu
- öffne Buch auf S.2-3
- Klappe Buch zu
- öffne Buch auf S.4-5
- Klappe Buch zu
- ....

Natürliche Iteration

- öffne Buch auf S.1
- blättere um
- blättere um
- blättere um
- blättere um
- blättere um
- ...

Mutierende Funktionen

- Zeiger können (wie auch Referenzen) für Funktionen mit Effekt verwendet werden.

Beispiel

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

Übergabe der Adresse des Elements hinter `a`

- Solche Funktionen heissen *mutierend*

Übergabe der Adresse von `a`

Const-Korrektheit

- Es gibt auch *nicht* mutierende Funktionen, die auf Elemente eines Arrays zugreifen

Beispiel

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

- Kennzeichnung mit `const`: Objekte können durch solche `const`-Zeiger nicht im Wert verändert werden.

`const` ist nicht absolut

- Der Wert an einer Adresse kann sich ändern, auch wenn ein `const`-Zeiger diese Adresse speichert.

beispiel

```
int a[5];
const int* begin1 = a;
int*       begin2 = a;
*begin1 = 1;    // Fehler: *begin1 ist const
*begin2 = 1;    // ok, obwohl sich damit auch *begin1 ändert
```

- `const` ist ein Versprechen lediglich aus Sicht des `const`-Zeigers, keine absolute Garantie.

Algorithmen

Für viele alltägliche Probleme exisitieren 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
std::cout << "\n";
```

Algorithmen

Vorteile der Verwendung der Standardbibliothek

- Einfachere Implementation
- Fehlerquellen minimiert
- Guter, schneller Code
- Universeller Code (nächste Folie)
- Es existieren natürlich auch Algorithmen für schwierigere Probleme, wie z.B. das (effiziente) Sortieren eines Feldes

Algorithmen

Die gleichen vorgefertigten Algorithmen exisitieren für viele Datentypen

Beispiel: Füllen eines Feldes

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

std::string a[5];
std::fill (a, a+3, "bla");
for (int i=0; i<5; ++i)
    std::cout << a[i] << " "; // bla bla bla
std::cout << "\n";
```

Überladen von Funktionen

- Funktionen sind durch Ihren Namen im Gültigkeitsbereich ansprechbar
- Es ist sogar möglich, mehrere Funktionen des gleichen Namens zu definieren und zu deklarieren
- Die „richtige” Version wird aufgrund der *Signatur* der Funktion ausgewählt

Überladen von Funktionen

- Eine Funktion ist bestimmt durch Art, Anzahl und Reihenfolge der Argumente

```
double sq (double x) { ... }           // f1
int sq (int x) { ... }                 // f2
int pow (int b, int e) { ... }         // f3
int pow (int e) { return pow(2,e); } // f4
```

- Der Compiler wählt bei einem Funktionsaufruf automatisch die Funktion, welche „am besten passt” (wir vertiefen das nicht)

```
std::cout << sq (3);     // Compiler wählt f2
std::cout << sq (1.414); // Compiler wählt f1
std::cout << pow (2);    // Compiler wählt f4
std::cout << pow (3,3);  // Compiler wählt f3
```

Überladen von Funktionen

Mit dem Überladen von Funktionen lassen sich also

- verschiedene Aufrufvarianten des gleichen Algorithmus realisieren und / oder
- verschiedene Algorithmen für verschiedene Datentypen mit dem gleichen Namen verbinden.

Funktionert ein Algorithmus für verschiedene Datentypen identisch, so verwendet man in C++ *Templates*.

Templates: Die Über-Überladung

- Templates erlauben die Spezifikation eines Typs als Argument.

Beispiel: *fill* mit Templates

```
template <typename T>
void fill (T* begin , T* end, const T value) {
    for (T* ptr = begin; ptr != end; ++ptr)
        *ptr = value;
}
...
int a[5];
fill (a, a+5, 1);
std::string b[5];
fill (b, b+3, "bla");
```

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

Vektor-Iteratoren

Annahme: wir wollen einen Vektor mit einem Wert füllen

- Der vorher diskutierte *fill*-Algorithmus mit Templates funktioniert dafür nicht.
- Der Grund: Vektoren verhalten sich zwar wie Felder, sind aber keine; man kann nicht mit Hilfe von Zeigern auf ihnen operieren.
- Trotzdem funktioniert `std::fill` auch für Vektoren , wie folgt:

Vektor-Iteratoren

Beispiel: *fill* auf einem Vektor

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


...
std::vector <int> v(5);
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`
    für nicht-mutierenden Zugriff
  - `std::vector <int>::iterator`
    für mutierenden Zugriff
- Vektor-Iteratoren sind keine Zeiger, verhalten sich aber ebenso:
  - zeigen auf ein Vektor-Element und können dereferenziert werden
  - können mit arithmetischen Ausdrücken verwendet werden wie Zeiger

Vektor-Iteratoren

- Die Konversion Vektor ⇒ Iterator muss explizit gemacht werden
    - `v.begin()` zeigt auf das erste Element von `v`
    - `v.end()` zeigt auf das Element nach dem letzten Element von `v`
- Damit können wir einen Vektor traversieren

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

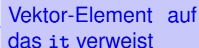
- . . . oder einen Vektor füllen:

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

Vektor-Iteratoren Programmbeispiel

```
typedef std::vector<int>::const_iterator Cvit;

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 << " ";
```

Typdefinition führt neuen Namen als Abkürzung für Typ ein. Erklärung folgt.



Vektor-Iteratoren Programmbeispiel

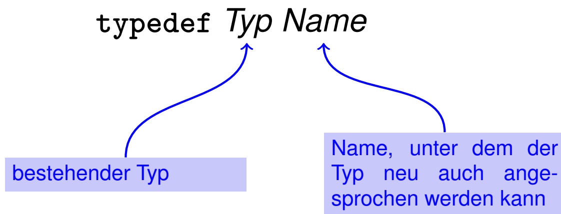
```
typedef std::vector<int>::iterator  Vit;

// 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.begin()[i] << " ";
```

Inkrementieren des Iterators

Kurzschreibweise für `*(v.begin()+i)`

Typdefinitionen

- Insbesondere bei komplizierten Typen kann die repetitive Verwendung des gleichen Typs umständlich sein
- Dann hilft die Möglichkeit der Deklaration eines *Typ-Alias* mit



Beispiele

```
typedef int number_type;
typedef std::vector<int> int_vec;
typedef int_vec::iterator Vit;
```

Container und Iteratoren

- Das Traversieren von Daten ist ein *generisches Verfahren*, das allgemein auf *Container* angewendet werden kann.
- Ein Container ist ein Objekt, welches
  - Elemente eines zugrundeliegenden Typs speichern kann
  - mindestens die Möglichkeit zur Traversierung aller seiner Elemente anbietet
- Felder und Vektoren sind solche Container

Bei Feldern und Vektoren wird Traversierung über Iteratoren / Zeiger (natürlich) oder durch wahlfreien Zugriff angeboten

Mengen (Sets)

- Eine Menge ist eine ungeordnete Zusammenfassung von Elementen, wobei jedes Element nur einmal vorkommen kann

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

- In C++ repräsentiert der Typ `std::set<T>` eine Menge von Elementen vom Typ `T`

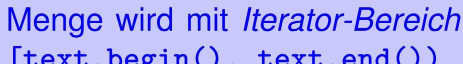
Mengen: Beispiel einer Anwendung

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

Buchstabensalat (1)

- Fasse den Text als Menge von Buchstaben auf:

```
#include<set>
...
typedef std::set<char>::const_iterator Sit;

...
std::string text =
"What are the distinct characters in this string?";

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



Buchstabensalat (2)

- Stelle fest, ob der Text ein Fragezeichen enthält und gib alle im Text enthaltenen Buchstaben aus

Generischer Suchalgorithmus, aufrufbar mit 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 (Sit it = s.begin(); it != s.end(); ++it)
    std::cout << *it;

std::cout << "\n";
```

Ausgabe:

```
Good question!
?Wacdeghinrst
```

Wahlfreier Zugriff auf Mengen?

- Kann man auf Mengen mit wahlfreiem Zugriff operieren?

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

Fehlermeldung: no subscript operator

- Nein, Mengen sind ungeordnet und unterstützen keinen wahlfreien Zugriff. Es gibt kein "i-tes Element".

Das Konzept der Iteratoren

- C++kennt verschiedene Iterator-Typen
  - Alle unterstützen den Dereferenz-Operator * und Traversieren mit ++
  - Manche unterstützen mehr, z.B. wahlfreien Zugriff oder rückwärts iterieren mit --
- Jeder Container-verarbeitende Algorithmus der Standardbibiothek ist *generisch*, funktioniert also für alle Container, deren Iteratoren bestimmte Anforderungen erfüllen
  - `std::find` erfordert z.B. nur * und ++
  - Weitere Details des Container-Typs sind für den Algorithmus nicht von Bedeutung

Warum Zeiger und Iteratoren?

Würde man nicht diesen Code

```
for (int i=0; i<n; ++i)
    a[i] = 0;
```

gegenüber folgendem Code bevorzugen?

```
for (int* ptr=a; ptr<a+n; ++ptr)
    *ptr = 0;
```

Vielleicht, aber um (hier noch besser!) das generische `std::fill(a, a+n, 0);` benutzen zu können, *müssen* wir mit Zeigern arbeiten.

Warum Zeiger und Iteratoren?

Zur Verwendung der Standardbibliothek muss man also wissen:

- statisches Feld `a` ist zugleich ein Zeiger auf das erste Element von `a`
- `a+i` is ein Zeiger auf das Element mit Index i

Verwendung der Standardbibliothek mit anderen Containern: Zeiger $\Rightarrow$ Iteratoren

Warum Zeiger und Iteratoren?

Beispiel: Zum Suchen des kleinsten Elementes eines Containers im Bereich $[\mathrm{begin}, \mathrm{end})$ verwende

```
std::min_element(begin, end)
```

- Gibt einen *Iterator* auf das kleinste Element zurück.
- Zum Auslesen des kleinsten Elementes muss man noch dereferenzieren:

  ```
  *std::min_element(begin, end)
  ```

Darum Zeiger und Iteratoren

- Selbst für Nichtprogrammierer und “dumme” Nur-Benutzer der Standardbibliothek: Ausdrücke der Art
  ```
  *std::min_element(begin, end)
  ```
  lassen sich ohne die Kenntnis von Zeigern und Iteratoren nicht verstehen.
- Hinter den Kulissen der Standardbibliothek ist das Arbeiten mit dynamischem Speicher auf Basis von Zeigern unvermeidbar. Mehr dazu später in der Vorlesung!