13. Felder (Arrays) II

Strings, Lindenmayer-Systeme, Mehrdimensionale Felder, Vektoren von Vektoren, Kürzeste Wege, Felder und Vektoren als Funktionsargumente

Strings als Felder

- sind repräsentierbar mit zugrundeliegendem Typ `char`

```
char text[] a = ...
```

- können durch String-Literale initialisiert werden

```
char text[] = "bool"
```

- dies entspricht der folgenden Initialisierung

```
char text[] = {'b','o','o','l','\0'}
```

- können nur mit konstanter Grösse definiert werden

Texte

- können mit dem Typ `std::string` aus der Standardbibliothek repräsentiert werden.
-

```
std::string text = "bool";
```

definiert einen String der Länge 4

- Ein String ist im Prinzip ein Feld mit zugrundeliegendem Typ `char`, plus Zusatzfunktionalität
- Benutzung benötigt `#include <string>`

Strings: gepimpte `char`-Felder

Ein `std::string`...

- kennt seine Länge

```
text.length()
```

gibt Länge als `int` zurück (Aufruf einer Mitglieds-Funktion; später in der Vorlesung)

- kann mit variabler Länge initialisiert werden

```
std::string text (n, 'a')
```

`text` wird mit n `'a'`s gefüllt

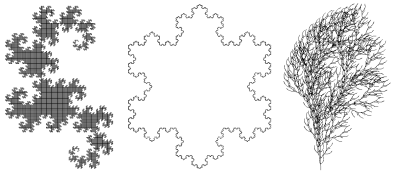
- „versteht" Vergleiche

```
if (text1 == text2) ...
```

`true` wenn `text1` und `text2` übereinstimmen

Lindenmayer-Systeme (L-Systeme)

Fraktale aus Strings und Schildkröten



L-Systeme wurden vom ungarischen Biologen Aristid Lindenmayer (1925–1989) zur Modellierung von Pflanzenwachstum erfunden.

Definition und Beispiel

- Alphabet Σ
- Σ^*: alle endlichen Wörter über Σ
- Produktion $P : \Sigma \to \Sigma^*$
- Startwort $s_0 \in \Sigma^*$

- $\{\mathrm{F}, +, -\}$
c	$P(c)$
F	F + F +
+	+
−	−
- F

Definition

Das Tripel $\mathcal{L} = (\Sigma, P, s_0)$ ist ein L-System.

Die beschriebene Sprache

Wörter $w_0, w_1, w_2, \ldots \in \Sigma^*$: $P(\mathrm{F}) = \mathrm{F} + \mathrm{F} +$

$w_0 := s_0$ $\quad w_0 := \mathrm{F}$

$w_1 := P(w_0)$ $\quad w_1 := \mathrm{F}+\mathrm{F}+$

$w_2 := P(w_1)$ $\quad w_2 := \mathrm{F}+\mathrm{F}+{+}\mathrm{F}+\mathrm{F}+{+}$

$P(\mathrm{F})P(+)P(\mathrm{F})P(+)$

$\vdots$ $\quad \vdots$

Definition

$P(c_1 c_2 \ldots c_n) := P(c_1)P(c_2)\ldots P(c_n)$

Turtle-Grafik

Schildkröte mit Position und Richtung

Schildkröte versteht 3 Befehle:

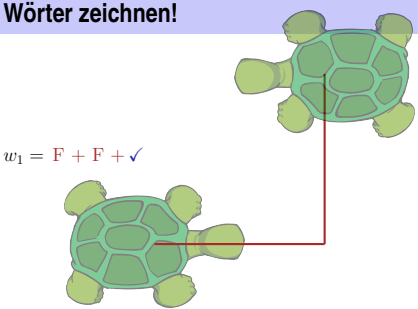
F: Gehe einen Schritt vorwärts ✓

Spur

+: Drehe dich um 90 Grad ✓

−: Drehe dich um −90 Grad ✓

Wörter zeichnen!



lindenmayer.cpp: Hauptprogramm

Wörter $w_0, w_1, w_2, \ldots w_n \in \Sigma^*$: `std::string`

```
...
#include "turtle.h"
...
std::cout << "Number of iterations =? ";
unsigned int n;
std::cin >> n;

std::string w = "F";

for (unsigned int i = 0; i < n; ++i)
  w = next_word (w);

draw_word (w);
```

$w = w_0 = \mathrm{F}$

$w = w_i \rightarrow w = w_{i+1}$

Zeichne $w = w_n$!

lindenmayer.cpp: next_word

```
// POST: replaces all symbols in word according to their
//       production and returns the result
std::string next_word (std::string word) {
  std::string next;
  for (unsigned int k = 0; k < word.length(); ++k)
    next += production (word[k]);
  return next;
}

// POST: returns the production of c
std::string production (char c) {
  switch (c) {
  case 'F': return "F+F+";
  default: return std::string (1, c); // trivial production c -> c
  }
}
```


lindenmayer.cpp: draw_word

```
// POST: draws the turtle graphic interpretation of word
void draw_word (std::string word)
{
  for (unsigned int k = 0; k < word.length(); ++k)
    switch (word[k]) {
    case 'F':
      turtle::forward();
     break;
    case '+':
      turtle::left(90);
      break;
    case '-':
      turtle::right(90);
    }
}
```

Springe zum case, der word[k] entspricht.

Vorwärts! (Funktion aus unserer Schildkröten-Bibliothek)

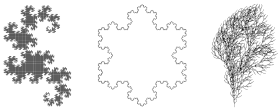
Überspringe die folgenden cases

Drehe dich um 90 Grad! (Funktion aus unserer Schildkröten-Bibliothek)

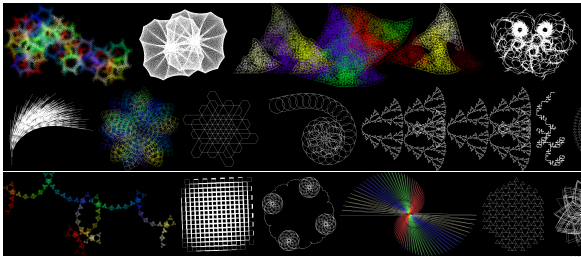
Drehe dich um -90 Grad! (Funktion aus unserer Schildkröten-Bibliothek)

L-Systeme: Erweiterungen

- Beliebige Symbole ohne grafische Interpretation (`dragon.cpp`)
- Beliebige Drehwinkel (`snowflake.cpp`)
- Sichern und Wiederherstellen des Schildkröten-Zustandes → Pflanzen (`bush.cpp`)



L-System-Challenge: `amazing.cpp`!



Mehrdimensionale Felder

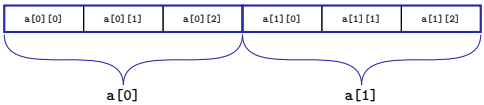
- sind Felder von Feldern
- dienen zum Speichern von *Tabellen, Matrizen,...*

```
int a[2][3]
```

`a` hat zwei Elemente, und jedes von ihnen ist ein Feld der Länge 3 mit zugrundeliegendem Typ `int`

Mehrdimensionale Felder

Im Speicher: flach



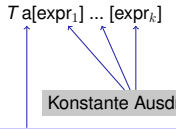
Im Kopf: Matrix

Spalten →

Zeilen ↓	0	1	2
0	a[0][0]	a[0][1]	a[0][2]
1	a[1][0]	a[1][1]	a[1][2]

Mehrdimensionale Felder

- sind Felder von Feldern von Feldern ....



a hat $expr_1$ Elemente und jedes von ihnen ist ein Feld mit $expr_2$ Elementen, von denen jedes ein Feld mit $expr_3$ Elementen ist, ...

Mehrdimensionale Felder

Initialisierung:

```
int a[][3] =
    {
        {2,4,6},{1,3,5}
    }
```

Erste Dimension kann weggelassen werden

2	4	6	1	3	5

Vektoren von Vektoren

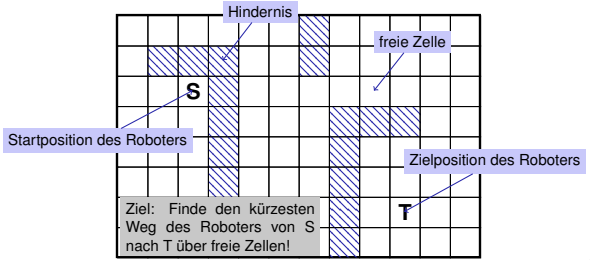
- Wie bekommen wir mehrdimensionale Felder mit variablen Dimensionen?
- Lösung: Vektoren von Vektoren

Beispiel: Vektor der Länge n von Vektoren der Länge m:

```
std::vector<std::vector<int> > a (n,
                  std::vector<int>(m));
```

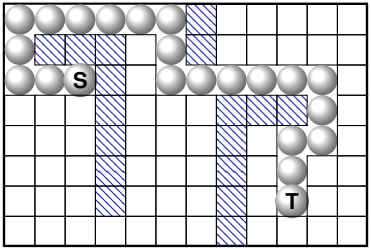

Anwendung: Kürzeste Wege

Fabrik-Halle ($n \times m$ quadratische Zellen)



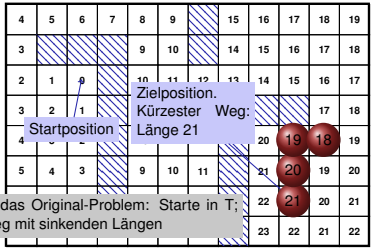
Anwendung: Kürzeste Wege

Lösung



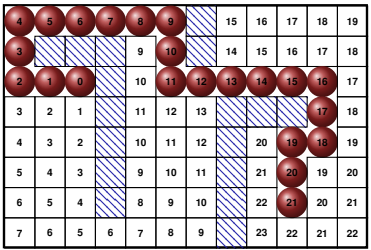
Ein (scheinbar) anderes Problem

Finde die *Längen* der kürzesten Wege zu *allen* möglichen Zielen

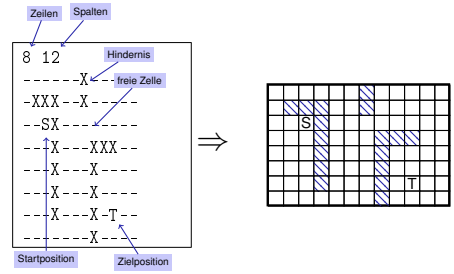


Ein (scheinbar) anderes Problem

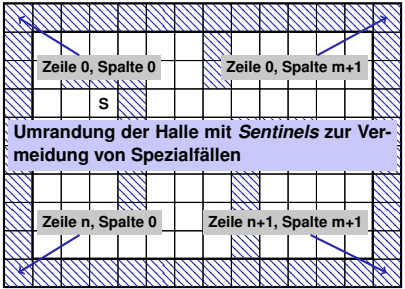
Finde die *Längen* der kürzesten Wege zu *allen* möglichen Zielen



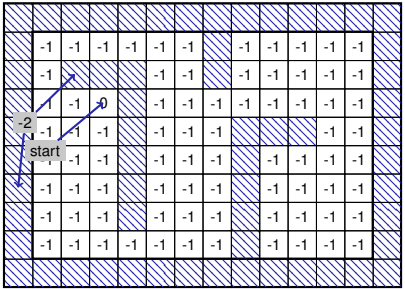
Vorbereitung: Eingabeformat



Vorbereitung: Wächter (*Sentinels*)



Vorbereitung: Initiale Markierung



Das Kürzeste-Wege-Programm

- Einlesen der Dimensionen und Bereitstellung eines zweidimensionalen Feldes für die Weglängen

```
#include<iostream>
#include<vector>

int main()
{
  // read floor dimensions
  int n; std::cin >> n; // number of rows
  int m; std::cin >> m; // number of columns

  // define a two-dimensional
  // array of dimensions
  // (n+2) x (m+2) to hold the floor plus extra walls around
  std::vector<std::vector<int> > floor (n+2, std::vector<int>(m+2));
```

Wächter (Sentinel)

Das Kürzeste-Wege-Programm

- Einlesen der Hallenbelegung und Initialisierung der Längen

```
int tr = 0;
int tc = 0;
for (int r=1; r<n+1; ++r)
  for (int c=1; c<m+1; ++c) {
    char entry = '-';
    std::cin >> entry;
    if       (entry == 'S') floor[r][c] = 0;
    else if (entry == 'T') floor[tr = r][tc = c] = -1;
    else if (entry == 'X') floor[r][c] = -2;
    else if (entry == '-') floor[r][c] = -1;
  }
```

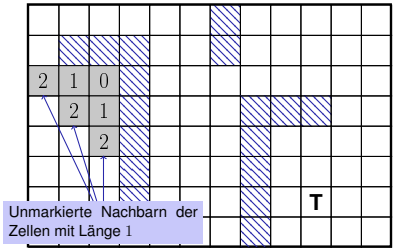
Das Kürzeste-Wege-Programm

- Hinzufügen der umschliessenden „Wände”

```
for (int r=0; r<n+2; ++r)
  floor[r][0] = floor[r][m+1] = -2;

for (int c=0; c<m+2; ++c)
  floor[0][c] = floor[n+1][c] = -2;
```


Markierung aller Zellen mit ihren Weglängen

Schritt 2: Alle Zellen mit Weglänge 2



Hauptschleife

Finde und markiere alle Zellen mit Weglängen $i = 1, 2, 3...$

```
for (int i=1;; ++i) {
  bool progress = false;
  for (int r=1; r<n+1; ++r)
    for (int c=1; c<m+1; ++c) {
     if (floor[r][c] != -1) continue;
     if (floor[r-1][c] == i-1 || floor[r+1][c] == i-1 ||
         floor[r][c-1] == i-1 || floor[r][c+1] == i-1 ) {
       floor[r][c] = i; // label cell with i
       progress = true;
     }
    }
  if (!progress) break;
}
```


Das Kürzeste-Wege-Programm

Markieren des kürzesten Weges durch „Rückwärtslaufen” vom Ziel zum Start

```
int r = tr; int c = tc;
while (floor[r][c] > 0) {
  const int d = floor[r][c] - 1;
  floor[r][c] = -3;
  if      (floor[r-1][c] == d) --r;
  else if (floor[r+1][c] == d) ++r;
  else if (floor[r][c-1] == d) --c;
  else ++c; // (floor[r][c+1] == d)
}
```

Markierung am Ende

	-3	-3	-3	-3	-3	-3		15	16	17	18	19
	-3				9	-3		14	15	16	17	18
	-3	-3	0		10	-3	-3	-3	-3	-3	-3	17
	3	2	1		11	12	13				-3	18
	4	3	2		10	11	12		20	-3	-3	19
	5	4	3		9	10	11		21	-3	19	20
	6	5	4		8	9	10		22	-3	20	21
	7	6	5	6	7	8	9		23	22	21	22

Das Kürzeste-Wege-Programm: Ausgabe

Ausgabe

```
for (int r=1; r<n+1; ++r) {
  for (int c=1; c<m+1; ++c)
    if (floor[r][c] == 0)
        std::cout << 'S';
    else if (r == tr && c == tc)
        std::cout << 'T';
    else if (floor[r][c] == -3)
        std::cout << 'o';
    else if (floor[r][c] == -2)
        std::cout << 'X';
    else
        std::cout << '-';
  std::cout << "\n";
}
```

⇒

```
oooooX-----
oXXX-oX-----
ooSX-oooooo-
---X---XXXo-
---X---X-oo-
---X---X-o--
---X---X-T--
-------X----
```


Das Kürzeste-Wege-Programm

- Algorithmus: *Breitensuche*
- Das Programm kann recht langsam sein, weil für jedes i alle Zellen durchlaufen werden
- Verbesserung: Für Markierung i, durchlaufe nur die Nachbarn der Zellen mit Markierung $i-1$
- Verbesserung: Stoppe sobald das Ziel erreicht wurde

Felder als Funktionsargumente

Felder können auch als *Referenz*-Argumente an eine Funktion übergeben werden. (Hier const, weil nur Lesezugriff nötig).

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

Felder als Funktionsargumente

Das geht auch für mehrdimensionale Felder.

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


Vektoren als Funktionsargumente

Vektoren können *per value*, aber auch als *Referenz*-Argumente an eine Funktion übergeben werden.

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

Hier: *Call by Reference* ist effizienter, weil der Vektor sehr lang sein kann.

Vektoren als Funktionsargumente

Das geht auch für mehrdimensionale Vektoren.

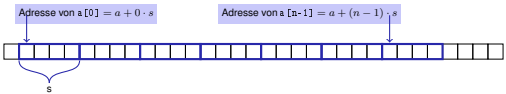
```
void print_matrix(const std::vector<std::vector<int> >& m) {
  for (int i = 0; i<m.size() ; ++i) {
    print_vector (m[i]);
    std::cout << "\n";
  }
}
```


14. Zeiger, Algorithmen, Iteratoren und Container I

Zeiger, Address- und Dereferenzoperator,
Feld-nach-Zeiger-Konversion

Wahlfreier Zugriff ist nützlich

```
int a[] = ...; // grosses Feld

a[13] = ...;
a[77] = ...;
a[50] = ...;
```



Wahlfreier Zugriff ist nützlich

```
int a[] = ...; // grosses Feld

a[13] = ...;
a[77] = ...;
a[50] = ...;
```

Berechne $a + 13 \cdot s$
Berechne $a + 77 \cdot s$
Berechne $a + 50 \cdot s$

Eine **Addition** und eine **Multiplikation** pro Elementzugriff

Wahlfreier Zugriff ist oft unnötig

```
int a[] = ...; // grosses Feld

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

Berechne $a + 0 \cdot s$
Berechne $a + 1 \cdot s$
Berechne $a + 2 \cdot s$
...

- Zugriffsmuster heisst **sequentieller Zugriff**
- Sollte nur eine **Addition** pro Elementzugriff „kosten“

Ein Buch lesen . . . mit wahlfreiem Zugriff . . . mit sequentiellem Zugriff

Wahlfreier Zugriff

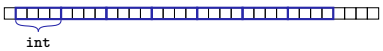
- öffne Buch auf S.1
- klappe Buch zu
- öffne Buch auf S.2-3
- klappe Buch zu
- öffne Buch auf S.4-5
- klappe Buch zu
- ....

Sequentieller Zugriff

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

Gesucht: Zeiger auf Feldelemente

```
for (Zeiger z = Anfang von a;
     z < Ende von a;
     Erhöhe z um Speicherbreite von int)
  a[i] = ...;
```



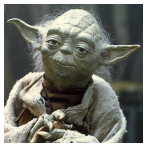
⇒ Wir müssen Speicheradressen direkt nutzen können!

- Abfragen: Anfang/Ende von `a`
- Vergleiche: `z < ...`
- Arithmetik: `z` erhöhen

Referenzen: Wo ist Anakin?

„Suche nach Vader, und Anakin finden du wirst."

```
int anakin_skywalker = 9;
int& darth_vader = anakin_skywalker;
darth_vader = 22;

// anakin_skywalker = 22
```



Zeiger: Wo ist Anakin?

„Anakins Adresse ist 0x7fff6bdd1b54."

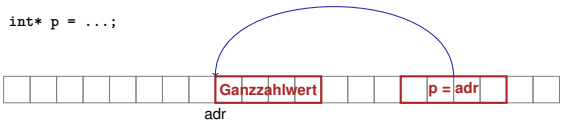
```
int anakin_skywalker = 9;
int* here = &anakin_skywalker;
std::cout << here; // Adresse
*here =  22;

// anakin_skywalker = 22
```

Zeiger Typen

Wert eines Zeigers auf `T` ist die Adresse eines Objektes vom Typ `T`.

Beispiele

`int* p;` Variable `p` ist Zeiger auf ein `int`.
`float* q;` Variable `q` ist Zeiger auf ein `float`.



Adress-Operator

Der Ausdruck

L-Wert vom Typ `T`

↓

& lval

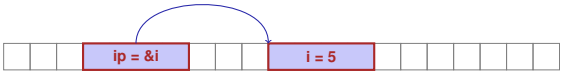
liefert als R-Wert einen *Zeiger* vom Typ *T** auf das Objekt an der Adresse von *lval*

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*

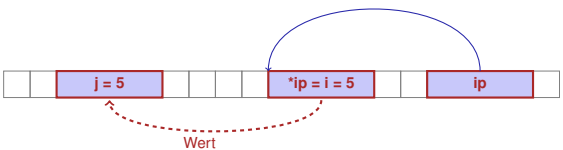
liefert als L-Wert den *Wert* des Objekts an der durch *rval* repräsentierten Adresse

Der Operator ∗ heisst Dereferenz-Operator.

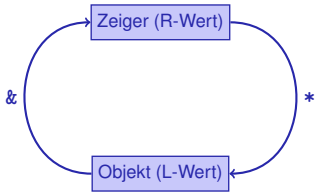
Dereferenz-Operator

Beispiel

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



Adress- und Dereferenzoperator



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!

Zeiger-Arithmetik: Zeiger plus `int`

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

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 $k - i$.

Konversion Feld $\Rightarrow$ Zeiger

Wie bekommen wir einen Zeiger auf das erste Element eines Feldes?

- 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”)

Die Wahrheit über wahlfreien Zugriff

Der Ausdruck

```
a[i]
```

ist äquivalent zu

```
*(a + i)
```

$$a + i \cdot s$$

Endlich: Iteration über ein Feld mit Zeigern

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
```

- `a+5` ist ein Zeiger direkt hinter das Ende des Feldes (past-the-end), der nicht dereferenziert werden darf.
- Zeigervergleich (`p < a+5`) bezieht sich auf die Reihenfolge der beiden Adressen im Speicher.