

Angewandte Informatik

Wintersemester 2015/16
Prof. Dr. rer. nat. Peter Gerwinski

Stand: 10. November 2015

Soweit nicht anders angegeben:

Copyright © 2012, 2013, 2015 Peter Gerwinski

Lizenz: CC-by-sa (Version 3.0) oder GNU GPL (Version 3 oder höher)

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1 Einführung | 5 |
| 1.1 Was ist angewandte Informatik? | 5 |
| 1.2 Programmierung in C | 5 |
| 2 Einführung in C | 6 |
| 2.1 Hello, world! | 6 |
| 2.2 Programme compilieren und ausführen | 7 |
| 2.3 Zahlenwerte ausgeben | 8 |
| 2.4 Elementares Rechnen | 10 |
| 2.5 Verzweigungen | 12 |
| 2.6 Schleifen | 15 |
| 2.7 Seiteneffekte | 17 |
| 2.8 Strukturierte Programmierung | 18 |
| 2.9 Funktionen | 20 |
| 2.10 Zeiger | 22 |
| 2.11 Arrays und Strings | 23 |
| 2.11.1 Arrays | 23 |
| 2.11.2 Strings | 23 |
| 2.11.3 Parameter des Hauptprogramms | 25 |
| 2.12 Strukturen | 26 |
| 3 Bibliotheken | 32 |
| 3.1 Der Präprozessor | 32 |
| 3.2 Bibliotheken einbinden | 33 |
| 3.3 Bibliotheken verwenden (Beispiel: OpenGL) | 36 |
| 3.4 Projekt organisieren: make | 38 |
| 3.4.1 make-Regeln | 39 |
| 3.4.2 make-Macros | 39 |
| 3.4.3 Fazit: 3 Sprachen | 40 |
| 4 Algorithmen | 40 |
| 4.1 Differentialgleichungen | 40 |
| 4.1.1 Beispiel: Pendelschwingung | 41 |
| 4.1.2 Das explizite Euler-Verfahren | 41 |
| 4.2 Rekursion | 43 |
| 4.3 Floodfill | 44 |
| 4.4 Stack und FIFO | 44 |
| 4.5 Wegfindungsalgorithmus für Roboterfahrzeug | 44 |
| 4.6 Aufwandsabschätzungen | 44 |
| 4.6.1 Sortieralgorithmen | 44 |
| 4.6.2 Landau-Symbole | 44 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | Hardwarenahe Programmierung | 46 |
| 5.1 | Bit-Operationen | 46 |
| 5.1.1 | Zahlensysteme | 46 |
| 5.1.2 | Bit-Operationen in C | 48 |
| 5.2 | I/O-Ports | 49 |
| 5.3 | Interrupts | 50 |
| 5.4 | volatile-Variable | 51 |
| 5.5 | Software-Interrupts | 52 |
| 5.6 | Byte-Reihenfolge – Endianness | 52 |
| 5.6.1 | Konzept | 52 |
| 5.6.2 | Dateiformate | 53 |
| 5.6.3 | Datenübertragung | 53 |
| 5.7 | Speicherausrichtung – Alignment | 54 |
| 6 | Ergänzungen und Ausblicke | 55 |
| 6.1 | String-Operationen | 55 |
| 6.2 | Dateien | 55 |
| 6.3 | Objektorientierte Programmierung | 56 |

1 Einführung

1.1 Was ist angewandte Informatik?

Die angewandte Informatik befaßt sich mit der Praxis der Programmierung von Computern. Sie vermittelt zwischen den Fachgebieten der Rechnertechnik („Wie funktioniert ein Computer?“) und der Softwaretechnik (Theorie des Programmierens).

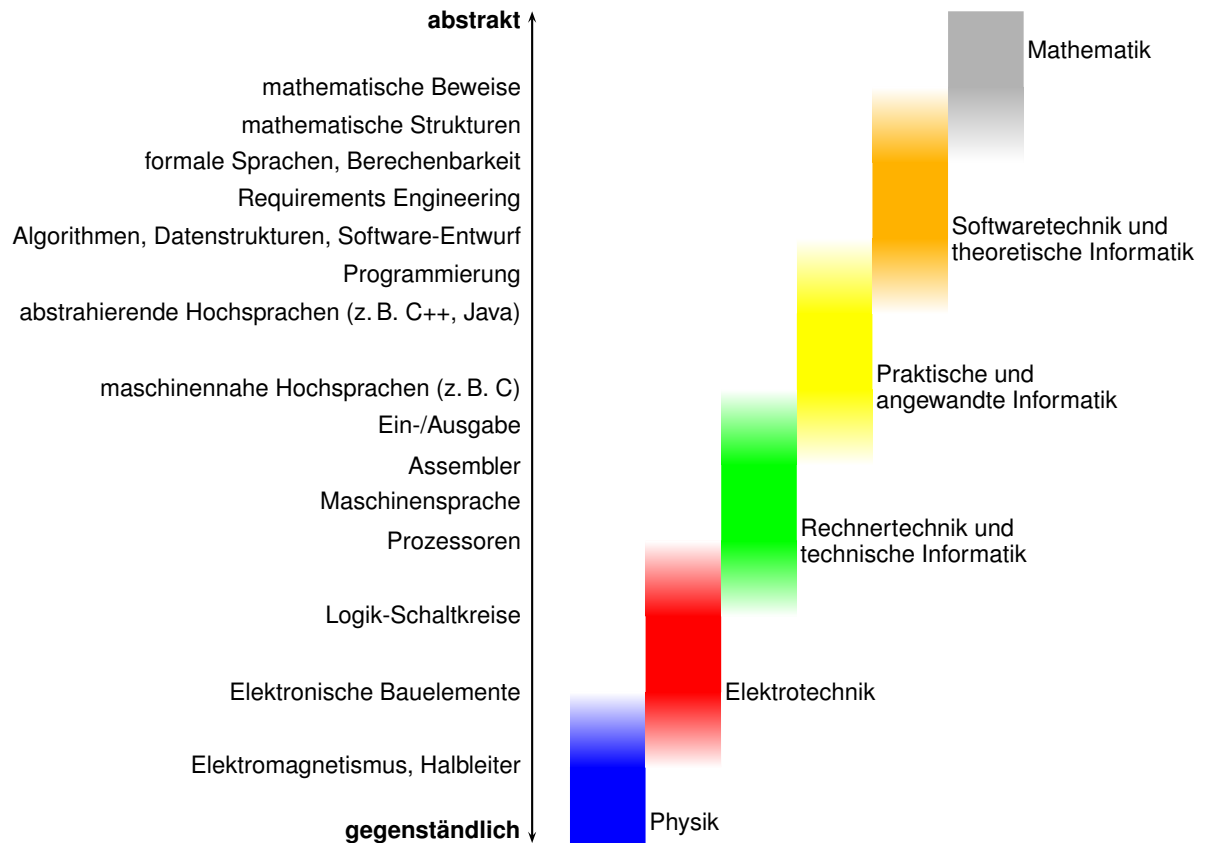


Abbildung 1: Wissenschaftliche Disziplinen mit Bezug zur Informatik, angeordnet nach Abstraktionsgrad ihres jeweiligen Gegenstandes

Im Gegensatz zu z. B. Lebewesen wurden Computer von Menschen entwickelt und gebaut. Daher ist es grundsätzlich möglich, sie durch Programmierung vollständig zu beherrschen.

1.2 Programmierung in C

Ein großer Teil dieser Vorlesung wird der Programmierung in der Programmiersprache C gewidmet sein.

Warum C?

C hat sich als Kompromiß zwischen einer Hochsprache und maximaler Nähe zur Hardware sehr weit etabliert. Es läuft auf nahezu jeder Plattform (= Kombination aus Hardware und Betriebssystem) und stellt somit einen „kleinsten gemeinsamen Nenner der Programmierung“ dar. C orientiert sich sehr eng an der Funktionsweise der Computer-Hardware und wird daher auch als „High-Level-Assembler“ bezeichnet.

Wie die Assembler-Sprache, die Sie in *Grundlagen Rechnertechnik* kennenlernen werden, ist C ein Profi-Werkzeug und als solches „leistungsfähig, aber gefährlich“. Programme können in C sehr kompakt geschrieben werden. C kommt mit verhältnismäßig wenigen Sprachelementen aus, die je nach Kombination etwas anderes bewirken. Dies hat zur Folge, daß einfache Schreibfehler, die in anderen Programmiersprachen als Fehler bemängelt würden, in C häufig ein ebenfalls gültiges Programm ergeben, das sich aber völlig anders als beabsichtigt verhält.

C wurde gemeinsam mit dem Betriebssystem Unix entwickelt und hat mit diesem wichtige Eigenschaften gemeinsam:

- **Kompakte Schreibweise:** Häufig verwendete Konstrukte werden möglichst platzsparend notiert. Wie in C, kann auch unter Unix ein falsch geschriebenes Kommando ein ebenfalls gültiges Kommando mit anderer Wirkung bedeuten.
- **Baukastenprinzip:** In C wie in Unix bemüht man sich darum, den unveränderlichen Kern möglichst klein zu halten. Das meiste, was man in C tatsächlich benutzt, ist in Form von Bibliotheken modularisiert; das meiste, was man unter Unix tatsächlich benutzt, ist in Form von Programmen modularisiert.
- **Konsequente Regeln:** In C wie in Unix bemüht man sich darum, feste Regeln – mathematisch betrachtet – möglichst einfach zu halten und Ausnahmen zu vermeiden. (Beispiel: Unter MS-DOS und seinen Nachfolgern wird eine ausführbare Datei gefunden, wenn sie sich *entweder* im aktuellen Verzeichnis *oder* im Suchpfad befindet. Unter Unix wird sie gefunden, wenn sie sich im Suchpfad befindet. Es ist unter Unix möglich, das aktuelle Verzeichnis in den Suchpfad aufzunehmen; aus Sicherheitserwägungen heraus geschieht dies jedoch üblicherweise nicht.)
- **Kein „Fallschirm“:** C und Unix führen Befehle ohne Nachfrage aus. (Beispiel: Ein eingegebener Unix-Befehl zum Formatieren einer Festplatte wird ohne Rückfrage ausgeführt.)

Trotz dieser Warnungen besteht bei Programmierübungen in C normalerweise *keine* Gefahr für den Rechner. Moderne PC-Betriebssysteme überwachen die aufgerufenen Programme und beenden sie notfalls mit einer Fehlermeldung („Schutzverletzung“). Experimente mit Mikro-Controllern, die im Rahmen dieser Vorlesung stattfinden werden, erfolgen ebenfalls in einer Testumgebung, in der kein Schaden entstehen kann.

Bitte nutzen Sie die Gelegenheit, in diesem Rahmen Ihre Programmierkenntnisse zu trainieren, damit Sie später in Ihrer beruflichen Praxis, wenn durch ein fehlerhaftes Programm ernsthafter Schaden entstehen könnte, wissen, was Sie tun.

2 Einführung in C

2.1 Hello, world!

Das folgende Beispiel-Programm (Datei: [hello-1.c](#)) gibt den Text „Hello, world!“ auf dem Bildschirm aus:

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    printf ("Hello, world!\n");
    return 0;
}
```

Dieses traditionell erste – „einfachste“ – Beispiel enthält in C bereits viele Elemente, die erst zu einem späteren Zeitpunkt zufriedenstellend erklärt werden können:

- **#include <stdio.h>**

Wir deuten diese Zeile im Moment so, daß uns damit gewisse Standardfunktionen (darunter `printf()` – siehe unten) zur Verfügung gestellt werden.

Diese Betrachtungsweise ist nicht wirklich korrekt und wird in Abschnitt 3.1 genauer erklärt.

- **int main (void) { ... }**

Dies ist das C-Hauptprogramm. Das, was zwischen den geschweiften Klammern steht, wird ausgeführt.

Auch hier wird zu einem späteren Zeitpunkt (Abschnitt 2.9) genauer erklärt werden, was die einzelnen Elemente bedeuten und welchen Sinn sie haben.

Im folgenden soll nun der eigentliche Inhalt des Programms erklärt werden:

```
printf("Hello,_world!\n");  
return 0;
```

- Bei beiden Zeilen handelt es sich um sogenannte *Anweisungen*.
- Jede Anweisung wird mit einem Semikolon abgeschlossen.
- Bei `printf()` handelt es sich um einen *Funktionsaufruf*, dessen Wirkung darin besteht, daß der zwischen den Klammern angegebene *Parameter* (oder: das *Argument*) der Funktion auf dem Standardausgabegerät ausgegeben wird. (In unserem Fall handelt es sich dabei um einen Bildschirm.) Der Name „`printf`“ der Funktion steht für „print formatted“ – formatierte Ausgabe.
- `"Hello,_world!\n"` ist eine *Konstante* vom Typ *String* (= Zeichenkette).
- `\n` ist eine *Escape-Sequenz*. Sie steht für ein einzelnes, normalerweise unsichtbares Zeichen mit der Bedeutung „neue Zeile“.
- Die Anweisung `return 0` bedeutet: Beende die laufende Funktion (hier: `main()`, also das Hauptprogramm) mit dem Rückgabewert 0. (Bedeutung: „Programm erfolgreich ausgeführt.“ – siehe Abschnitt 2.9.)

2.2 Programme compilieren und ausführen

Der Programmtext wird mit Hilfe eines Eingabeprogramms, des *Texteditors*, in den Computer eingegeben und als Datei gespeichert. Als Dateiname sei hier `hello-1.c` angenommen. Die Dateierdung `.c` soll anzeigen, daß es sich um einen Programmquelltext in der Programmiersprache C handelt.

Die `.c`-Datei ist für den Computer nicht direkt ausführbar. Um eine ausführbare Datei zu erhalten, muß das Programm zuerst in die Maschinensprache des verwendeten Computers übersetzt werden. Diesen Vorgang nennt man *Compilieren*.

In einer Unix-Shell mit installierter GNU-Compiler-Collection (GCC; frühere Bedeutung der Abkürzung: GNU-C-Compiler) geschieht das Compilieren durch Eingabe der folgenden Zeile, der *Kommandozeile*:

```
$ gcc hello-1.c -o hello-1
```

Das Zeichen `$` steht für die *Eingabeaufforderung* (oder das *Prompt*) der Unix-Shell. Es kann auch anders aussehen, z. B. `voyager2/home/peter/bo/2012ws/ainf/script/examples>`. Die Eingabeaufforderung wird vom Computer ausgegeben; die Kommandozeile rechts daneben müssen wir eingeben und mit der Eingabetaste (Enter) bestätigen.

`gcc` ist ein Befehl an den Computer, nämlich der Name eines Programms, das wir aufrufen wollen (hier: der Compiler). Die darauf folgenden Teile der Kommandozeile heißen die *Parameter* oder *Argumente* des Befehls.

Der Parameter `hello-1.c` ist der Name der Datei, die compiliert werden soll.

`-o` ist eine *Option* an den Compiler, mit der man ihm mitteilt, daß der nächste Parameter `hello-1` der Name der ausführbaren Datei ist, die erzeugt werden soll.

Unter Unix ist es üblich, ausführbaren Dateien *keine* Endung zu geben. Unter Microsoft Windows wäre es stattdessen üblich, die ausführbare Datei `hello-1.exe` zu nennen.

Um von einer Unix-Shell aus ein Programm aufzurufen, gibt man dessen vollständigen Namen – einschließlich Verzeichnispfad und eventueller Endung – als Kommando ein:

```
$ ./hello-1
```

Der Punkt steht für das aktuelle Verzeichnis; der Schrägstrich trennt das Verzeichnis vom eigentlichen Dateinamen.

Wenn sich ein Programm im Suchpfad befindet (z. B.: `gcc`), darf die Angabe des Verzeichnisses entfallen. (Den Suchpfad kann man sich mit dem Kommando `echo $PATH` anzeigen lassen.) Aus Sicherheitsgründen steht das aktuelle Verzeichnis unter Unix üblicherweise *nicht* im Suchpfad.

Dateiendungen dienen unter Unix nur der Übersicht, haben aber keine technischen Konsequenzen:

- Ob eine Datei als ausführbar betrachtet wird oder nicht, wird nicht anhand einer Endung, sondern über ein *Dateiattribut* entschieden. Die Dateiattribute werden beim Listen des Verzeichnisinhalts angezeigt:

```
$ ls -l
-rwxr-x--- 1 peter ainf 6294  4. Okt 14:34 hello-1
-rw-r--r-- 1 peter ainf   82  4. Okt 15:11 hello-1.c
```

Jedes *r* steht für „read“ (Datei lesbar), jedes *w* für „write“ (Datei schreibbar) und jedes *x* für „execute“ (Datei ausführbar). Von links nach rechts stehen die *rw**x*-Gruppen für den Besitzer der Datei (hier: *peter*) eine Benutzergruppe (hier: *ainf*) und für alle anderen Benutzer des Computers.

Im o. a. Beispiel ist die Datei *hello-1.c* für den Benutzer *peter* les- und schreibbar, für alle Angehörigen der Gruppe *ainf* nur lesbar und für alle anderen Benutzer des Computers ebenfalls nur lesbar. Die Datei *hello-1* (ohne Endung) ist hingegen für den Benutzer *peter* les-, schreib- und ausführbar, für alle Angehörigen der Gruppe *ainf* les- und ausführbar, aber nicht schreibbar. Alle anderen Benutzer des Computer haben für die Datei *hello-1* überhaupt keine Zugriffsrechte.

- Welcher Art der Inhalt der Datei ist, entnimmt Unix dem Inhalt selbst. Man kann sich dies mit Hilfe des Befehls *file* anzeigen lassen:

```
$ file hello-1
hello-1: ELF 32-bit LSB executable, Intel 80386, version 1 (SYSV),
dynamically linked (uses shared libs), for GNU/Linux 2.6.18,
not stripped
$ file hello-1.c
hello-1.c: ASCII C program text
```

- Eine ausführbare Datei, die Text enthält, ist ein sogenanntes *Shell-Skript*. Der Aufruf eines Shell-Skripts bewirkt i. w. dasselbe, als wenn man den darin enthaltenen Text als Kommandos eingeben würde.
- Ein C-Quelltext enthält i. d. R. *keine* gültigen Unix-Kommandos und kann daher *nicht* „einfach so“ ausgeführt werden.
- Es ist zulässig, aber normalerweise nicht sinnvoll, einer ausführbaren Datei die Endung *.c* zu geben.

2.3 Zahlenwerte ausgeben

Da es möglich ist, mittels der Funktion *printf()* eine String-Konstante wie z. B. *"Hello, world!\n"* „einfach so“ auszugeben, liegt die Vermutung nahe, Integer-Konstanten auf gleiche Weise ausgeben zu können.

Datei *output-12.c*:

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    printf (42);
    return 0;
}
```

Beim Compilieren dieses Programms erhalten wir eine Warnung:

```
$ gcc output-12.c -o output-12
output-12.c: In function 'main':
output-12.c:5: warning: passing argument 1 of 'printf'
makes pointer from integer without a cast
/usr/include/stdio.h:339: note: expected
'const char * __restrict__' but argument is of type 'int'
```


Es entsteht trotzdem eine ausführbare Datei `output-12`. Wenn wir diese jedoch ausführen, erhalten wir eine Fehlermeldung:

```
$ ./output-12
Segmentation fault
```

Tatsächlich ist die direkte Übergabe einer Integer-Konstanten an `printf()` ein grober Fehler: `printf()` akzeptiert als ersten Parameter nur Ausdrücke vom Typ `String`. Der C-Compiler nimmt eine implizite Umwandlung der Integer-Konstanten in einen `String` vor: Die Zahl wird als eine Speicheradresse interpretiert, an der sich der Text befindet. Dies ist nicht besonders sinnvoll (daher die Warnung), aber in C zulässig.

Wenn nun das Programm ausgeführt wird, versucht es, auf die Speicheradresse Nr. 42 zuzugreifen. Diese befindet sich normalerweise außerhalb des Programms. Das Betriebssystem bemerkt den illegalen Zugriffsversuch und bricht das Programm mit einer Fehlermeldung („Speicherzugriffsfehler“, „Schutzverletzung“ o. ä.) ab.

Auf einer Plattform ohne derartige Schutzmechanismen (z. B. einem Mikro-Controller) wird das fehlerhafte Programm hingegen klaglos ausgeführt. Es werden dann sinnlose Texte, die sich zufällig an Speicheradresse Nr. 42 befinden, auf dem Standardausgabegerät ausgegeben.

Dieses fehlerhafte Programm illustriert, wie leicht es in der Programmiersprache C ist, einen Absturz zu programmieren. Die meisten anderen Programmiersprachen würden das fehlerhafte Programm nicht akzeptieren; anstelle der o. a. Warnung bekäme man eine ähnlichlautende Fehlermeldung.

Wie man nun tatsächlich in C Zahlenwerte ausgibt, illustriert das Beispielprogramm `output-1.c`:

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    printf ("Die_Antwort_lautet:_%d\n", 42);
    return 0;
}
```

Der erste Parameter von `printf()`, der sog. *Format-String*, enthält das Symbol `%d`. Diese sog. *Formatspezifikation* wird in der Ausgabe durch den Zahlenwert des zweiten Parameters von `printf()` ersetzt. Das `d` steht hierbei für „dezimal“.

Wenn man zwischen das Prozentzeichen und das `d` eine Zahl schreibt (z. B. `%3d`), gibt man damit die Breite eines Feldes an, in die die auszugebende Zahl rechtsbündig geschrieben wird. Wenn man die Feldbreite mit einer Null beginnen läßt (z. B. `%03d`) wird die auszugebende Zahl von links mit Nullen bis zur Feldbreite aufgefüllt.

Eine vollständige Liste der in `printf()` zulässigen Formatspezifikationen finden Sie in der Dokumentation des Compiler-Herstellers zu `printf()`. Von der Unix-Shell aus können Sie diese mit dem Befehl `man 3 printf` abrufen.

Bemerkungen:

- Ein Text darf auch Ziffern enthalten. Anhand der Ausgabe sind `printf ("42\n");` und `printf ("%d\n", 42);` nicht voneinander unterscheidbar.
- Die Position des `\n` ist relevant, z. B. geht `printf ("\n42");` zuerst in eine neue Zeile und gibt danach den Text aus. Auch mehrere `\n` in derselben String-Konstanten sind zulässig.
- C akzeptiert auch sehr seltsame Konstrukte. Das folgende Beispiel (Datei: `hello-5.c`)

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    printf ("Hello,_world!\n");
    "\n";
    return 0;
}
```

wird vom Compiler akzeptiert. (Warum das so ist, wird in Abschnitt 2.7 behandelt.)

Bei Verwendung der zusätzlichen Option `-Wall` erhalten wir zumindest eine Warnung über eine „Anweisung ohne Effekt“:

```
$ gcc -Wall hello-5.c -o hello-5
hello-5.c: In function 'main':
hello-5.c:6: warning: statement with no effect
```

Es empfiehlt sich, die Option `-Wall` grundsätzlich zu verwenden und die Warnungen ernstzunehmen.

Wenn mehrere Werte ausgegeben werden sollen, verwendet man in `printf()` mehrere Formatspezifikationen und gibt mehrere Werte als Parameter an (Datei: `output-7.c`):

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    printf ("Richtige_Antworten_wären_%d_oder_%d_oder_sonstige.\n", 1, 2);
    return 0;
}

$ gcc output-7.c -o output-7
$ ./output-7
Richtige Antworten wären 1 oder 2 oder sonstige.
$
```

Achtung: Zu viele oder zu wenige Werte in der Parameterliste ergeben trotzdem ein gültiges, wenn auch fehlerhaftes C-Programm (Datei: `output-6.c`):

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    printf ("Richtige_Antworten_wären_%d", 1, "_oder_%d", 2, "_oder_sonstige.\n");
    return 0;
}
```

Wenn man dieses Programm laufen läßt, wird nicht etwa das zweite `%d` durch den Zahlenwert 2 ersetzt. Vielmehr endet das, was ausgegeben wird, mit dem ersten `%d`, für das der Zahlenwert 1 eingesetzt wird, und alles, was nach der 1 kommt, wird schlichtweg ignoriert.

```
$ gcc output-6.c -o output-6
$ ./output-6
Richtige Antworten wären 1$
```

Bei Verwendung der Option `-Wall` erhalten wir auch hier eine Warnung:

```
$ gcc -Wall output-6.c -o output-6
output-6.c: In function 'main':
output-6.c:5: warning: too many arguments for format
```

2.4 Elementares Rechnen

Der *binäre Operator* `+` kann in C (und den meisten Programmiersprachen) dazu verwendet werden, zwei Integer-Ausdrücke, die sogenannten *Operanden*, durch Addition zu einem neuen Integer-Ausdruck zu verknüpfen.

Beispiel: `mathe-1.c`

```
#include <stdio.h>

int main (void)
```

```

{
    printf ("%d\n", 23 + 19);
    return 0;
}

```

(Tatsächlich führt bereits die erste Stufe des Compilers eine Optimierung durch, die bewirkt, daß die ausführbare Datei keine Additionsbefehle, sondern direkt das Ergebnis der Addition enthält.)

Die Operatoren für die Grundrechenarten lauten in C:

| | |
|---|--|
| + | Addition |
| − | Subtraktion |
| * | Multiplikation |
| / | Division: Bei ganzen Zahlen wird grundsätzlich abgerundet. |
| % | Modulo-Operation: Rest bei Division (39 % 4 ergibt 3.) |

Die Verwendung von *Variablen* erfordert in C eine vorherige Deklaration.

```
int a;
```

dekliert eine Variable vom Typ Integer,

```
int a, b;
```

dekliert zwei Variable vom Typ Integer, und

```
int a, b = 3;
```

dekliert zwei Variable vom Typ Integer und initialisiert die zweite mit dem Wert 3.

Für Fließkommazahlen verwendet man meistens den Datentyp **double**:

```
double x = 3.141592653589793;
```

Die Bezeichnung **double** steht für „doppelt genau“. Daneben gibt es noch einen Datentyp **float** für „einfach genaue“ Fließkommazahlen sowie einen Datentyp **long double** noch höhere Genauigkeiten. Typischerweise folgen Fließkommazahlen in C dem Standard IEEE 754. In diesem Fall hat **float** eine Genauigkeit von ca. 6 und **double** eine Genauigkeit von ca. 15 Nachkommastellen.

Das Einlesen von Werten erfolgt in C mit der Funktion **scanf()**.

Das Beispielprogramm **input-1.c** liest einen Wert vom Standardeingabegerät (hier: Tastatur) ein und gibt das Doppelte des Wertes auf dem Standardausgabegerät aus:

```

#include <stdio.h>

int main (void)
{
    double a;
    printf ("Bitte_eine_Zahl_eingeben:_");
    scanf ("%lf", &a);
    a = 2 * a;
    printf ("Das_Doppelte_der_Zahl_ist:_%lf\n", a);
    return 0;
}

```

Damit **scanf()** in die Variable **a** einen Wert schreiben kann, ist es erforderlich, nicht den aktuellen Wert von **a**, sondern die Variable selbst an **scanf()** zu übergeben. Dies geschieht durch Voranstellen eines Und-Symbols **&**. (Genaugenommen handelt es sich um die Übergabe einer Speicheradresse. Dies wird in Abschnitt 2.10 genauer behandelt.)

Wenn wir das **&** vergessen (Beispielprogramm: **input-3.c**), kann das C-Programm weiterhin compiliert werden. Bei Verwendung der Option **-Wall** erhalten wir eine Warnung. Wenn wir das Programm ausführen und versuchen, einen Wert einzugeben, stürzt das Programm ab. (Hintergrund: Es betrachtet den aktuellen – zufälligen – Wert der Variablen **a** als Adresse einer Speicherzelle, an der der eingelesene Wert gespeichert werden soll. Das Programm greift also schreibend auf eine Speicherzelle außerhalb des ihm zugeteilten Bereichs zu.)

Zuweisungen an Variable erfolgen in C mit Hilfe des binären Operators `=`. Es ist ausdrücklich erlaubt, den „alten“ Wert einer Variablen in Berechnungen zu verwenden, deren Ergebnis man dann derselben Variablen zuweist.

Die Zeile `a = 2 * a` in Zeile 8 von `input-1.c` ist insbesondere keine mathematische Gleichung (mit der Lösung 0 für die Unbekannte `a`), sondern die Berechnung des Doppelten des aktuellen Wertes der Variablen `a`, welches dann wiederum in der Variablen `a` gespeichert wird.

Die Funktion `scanf()` kann, analog zu `printf()`, gleichzeitig mehrere Werte abfragen. Hierzu müssen wir im Format-String mehrere Formatspezifikationen angeben und die Adressen mehrerer Variablen als Parameter übergeben.

Genau wie bei `printf()` werden überzählige Parameter ignoriert, und fehlende Parameter führen zu einem Absturz des Programms.

Zeichen zwischen den Formatspezifikationen fungieren als Trennzeichen. Damit die Zahlen angenommen werden, muß die Eingabe die Trennzeichen enthalten.

Für doppelt genaue Fließkommazahlen (**double**) lautet die Formatspezifikation `%lf`; für einfach genaue Fließkommazahlen (**float**) lautet sie `%f`.

(Siehe die Beispielprogramme `input-6.c` bis `input-11.c`.)

Weitere Informationen zu den Formatspezifikationen von `scanf()` finden Sie in der Dokumentation zu `scanf()`. (In der Unix-Shell können Sie diese mit dem Befehl `man 3 scanf` abrufen.)

2.5 Verzweigungen

Das Beispielprogramm `if-0.c`

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    int a, b;
    printf ("Bitte_a_eingeben:_");
    scanf ("%d", &a);
    printf ("Bitte_b_eingeben:_");
    scanf ("%d", &b);
    printf ("a_geteilt_durch_b_ist:_%d\n", a / b);
    return 0;
}
```

hat den Nachteil, daß bei Eingabe von 0 für die zweite Zahl das Programm abstürzt:

```
$ gcc -Wall if-0.c -o if-0
$ ./if-0
Bitte a eingeben: 13
Bitte b eingeben: 0
Floating point exception
```

Die Fehlermeldung stammt nicht vom Programm selbst, sondern vom Betriebssystem, das auf einen vom Prozessor signalisierten Fehlerzustand reagiert. („Floating point exception“ ist die Bezeichnung dieses Fehlerzustands. In diesem Fall ist die Bezeichnung leicht irreführend, da konkret dieser Fehler durch eine Division ganzer Zahlen ausgelöst wird.)

Für Programme wie dieses ist es notwendig, in Abhängigkeit von den Benutzereingaben unterschiedliche Anweisungen auszuführen. Diese sog. *Verzweigung* geschieht mittels einer `if`-Anweisung.

Beispielprogramm: `if-1.c`

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    int a, b;
```

```

printf ("Bitte_a_eingeben:_");
scanf ("%d", &a);
printf ("Bitte_b_eingeben:_");
scanf ("%d", &b);
if (b != 0)
    printf ("a_geteilt_durch_b_ist:_%d\n", a / b);
return 0;
}

```

In den Klammern hinter dem **if** steht ein Ausdruck, die sog. *Bedingung*. Die auf das **if** folgende Anweisung wird nur dann ausgeführt, wenn die Bedingung *ungleich Null* ist. (C kennt keinen eigenen „Booleschen“ Datentyp. Stattdessen steht **0** für den Wahrheitswert „falsch“ und alles andere für den Wahrheitswert „wahr“.)

Der binäre Operator **!=** prüft zwei Ausdrücke auf Ungleichheit. Er liefert **0** zurück, wenn beide Operanden gleich sind, und **1**, wenn sie ungleich sind.

Die **if**-Anweisung kennt einen optionalen **else**-Zweig. Dieser wird dann ausgeführt, wenn die Bedingung *nicht* erfüllt ist.

Beispielprogramm: **if-2.c**

```

#include <stdio.h>

int main (void)
{
    int a, b;
    printf ("Bitte_a_eingeben:_");
    scanf ("%d", &a);
    printf ("Bitte_b_eingeben:_");
    scanf ("%d", &b);
    if (b != 0)
        printf ("a_geteilt_durch_b_ist:_%d\n", a / b);
    else
        printf ("Bitte_nicht_durch_0_teilen!\n");
    return 0;
}

```

Sowohl auf das **if** als auch auf das **else** folgt nur jeweils *eine* Anweisung, die von der Bedingung abhängt.

In dem folgenden Beispielprogramm (Datei: **if-3.c**)

```

#include <stdio.h>

int main (void)
{
    int a, b;
    printf ("Bitte_a_eingeben:_");
    scanf ("%d", &a);
    printf ("Bitte_b_eingeben:_");
    scanf ("%d", &b);
    if (b != 0)
        printf ("a_geteilt_durch_b_ist:_%d\n", a / b);
    else
        printf ("Bitte_nicht_durch_0_teilen!\n");
        printf ("Das_tut_man_nicht.\n");
    return 0;
}

```

wird die Zeile `printf ("Das_tut_man_nicht.\n");` auch dann ausgeführt, wenn die Variable **b** ungleich 0 ist.

In C ist die Einrückung der Zeilen im Programmquelltext „nur“ eine optische Hilfe für Programmierer. Welche Anweisung von welcher Bedingung abhängt, entscheidet der Compiler allein anhand der Regeln der Programmiersprache, und diese besagen eindeutig: „Sowohl auf das **if** als auch auf das **else** folgt nur jeweils eine Anweisung, die von der Bedingung abhängt.“

Wenn wir möchten, daß mehrere Anweisungen von der Bedingung abhängen, müssen wir diese mittels geschweifeter Klammern zu einem sog. *Anweisungsblock* zusammenfassen.

Beispielprogramm: `if-5.c`

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    int a, b;
    printf ("Bitte_a_eingeben:_");
    scanf ("%d", &a);
    printf ("Bitte_b_eingeben:_");
    scanf ("%d", &b);
    if (b != 0)
        printf ("a_geteilt_durch_b_ist:_%d\n", a / b);
    else
    {
        printf ("Bitte_nicht_durch_0_teilen!\n");
        printf ("Das_tut_man_nicht.\n");
    }
    return 0;
}
```

Aus Sicht des Computers ist die Einrückung belanglos. Die folgende Schreibweise (Datei: `if-4.c`) ist für ihn vollkommen gleichwertig zu `if-5.c`:

```
#include <stdio.h>

int main (void) { int a, b; printf ("Bitte_a_eingeben:_"); scanf ("%d", &a);
printf ("Bitte_b_eingeben:_"); scanf ("%d", &b); if (b != 0) printf (
"a_geteilt_durch_b_ist:_%d\n", a / b); else printf ("Bitte_nicht_durch_0_teilen!\n");
printf ("Das_tut_man_nicht.\n"); return 0; }
```

Aus Sicht eines Menschen hingegen kann eine *korrekte* Einrückung des Quelltextes *sehr* hilfreich dabei sein, in einem Programm die Übersicht zu behalten. Daher hier der dringende Rat:

Achten Sie in Ihren Programmen auf korrekte und übersichtliche Einrückung!

Um zwei Ausdrücke auf Gleichheit zu prüfen, verwendet man in C den binären Operator `==`.

Die Anweisungen

```
if (b != 0)
{
    printf ("Die_erste_Zahl_geteilt_durch_die_zweite_ergibt:_");
    printf ("%d,_Rest_%d\n", a / b, a % b);
}
else
    printf ("Bitte_nicht_durch_0_teilen!\n");
```

sind also äquivalent zu:

```
if (b == 0)
    printf ("Bitte_nicht_durch_0_teilen!\n");
else
{
    printf ("Die_erste_Zahl_geteilt_durch_die_zweite_ergibt:_");
    printf ("%d,_Rest_%d\n", a / b, a % b);
}
```

Achtung: Die Anweisungen

```
if (b = 0)
    printf ("Bitte_nicht_durch_0_teilen!\n");
else
{
    printf ("Die_erste_Zahl_geteilt_durch_die_zweite_ergibt:_");
    printf ("%d_Rest_%d\n", a / b, a % b);
}
```

(mit `=` anstelle von `==`) sind ebenfalls gültiges C, haben jedoch eine andere Bedeutung!

Der Hintergrund ist der folgende: Alle binären Operatoren, sei es `+` oder `=` oder `==`, sind in C vom Prinzip her gleichwertig. Alle nehmen zwei numerische Operanden entgegen und liefern einen numerischen Wert zurück. Wenn wir nun beispielsweise annehmen, daß die Variable `a` den Wert 3 hat, dann gilt:

| | |
|---------------------|--|
| <code>a + 7</code> | ergibt 10. |
| <code>a = 7</code> | ergibt 7 (und weist <code>a</code> den Wert 7 zu). |
| <code>a == 7</code> | ergibt 0. |

Das o. a. Programmfragment bedeutet demnach: Weise der Variablen `b` den Wert 0 zu, und führe anschließend *immer* eine Division durch `b` aus. (Die `if`-Bedingung bekommt den Wert 0, ist also niemals erfüllt.)

Daß es sich bei Wahrheitswerten in C tatsächlich um Integer-Werte handelt, wird auch deutlich, wenn man sich diese mittels `printf()` ausgeben läßt.

Wenn man beispielsweise in dem folgenden Programm `if-10.c` den Wert 7 für die Variable `b` eingibt,

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    int b;
    printf ("Bitte_b_eingeben:_");
    scanf ("%d", &b);
    printf ("Der_Ausdruck_b_!=_0_hat_den_Wert_%d\n", b != 0);
    printf ("Der_Ausdruck_b_==_0_hat_den_Wert_%d\n", b == 0);
    printf ("Der_Ausdruck_b_=_0_hat_den_Wert_%d\n", b = 0);
    return 0;
}
```

lautet die Ausgabe:

```
$ ./if-10
Bitte b eingeben: 7
Der Ausdruck b != 0 hat den Wert 1
Der Ausdruck b == 0 hat den Wert 0
Der Ausdruck b = 0 hat den Wert 0
```

In der ersten und zweiten Zeile wird geprüft, ob `b` den Wert 0 hat, und 1 für „ja“ bzw. 0 für „nein“ ausgegeben. In der dritten Zeile wird `b` der Wert 0 zugewiesen und anschließend der neue Wert von `b` ausgegeben.

2.6 Schleifen

Mit Hilfe der `while`-Anweisung ist es möglich, Anweisungen in Abhängigkeit von einer Bedingung mehrfach auszuführen.

Das folgende Beispielprogramm `loop-1.c` schreibt die Zahlen von 1 bis einschließlich 10 auf den Bildschirm:

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    int a;
```

```

i = 1;
while (i <= 10)
{
    printf ("%d\n", i);
    i = i + 1;
}
return 0;
}

```

Die Auswertung der Bedingung erfolgt analog zur **if**-Anweisung. Ebenso folgt auf **while** nur eine einzige Anweisung, die wiederholt ausgeführt wird; mehrere Anweisungen müssen mit geschweiften Klammern zu einem Anweisungsblock zusammengefaßt werden.

Der binäre Operator **<=** liefert 1 zurück, wenn der linke Operand kleiner oder gleich dem rechten ist, ansonsten 0. Entsprechend sind die Operatoren **>=**, **<** und **>** definiert.

Ein wichtiger Spezialfall einer **while**-Schleife ist die folgende Situation:

- Vor dem Betreten der Schleife findet eine Initialisierung statt, z. B. **i = 1**.
- Am Ende jedes Schleifendurchlaufs wird eine „Schritt-Anweisung“ durchgeführt, z. B. **i = i + 1**.

Für dieses spezielle **while** kennt C die Abkürzung **for**:

| | | |
|---|------------------------|---|
| <pre> i = 1; while (i <= 10) { printf ("%d\n", i); i = i + 1; } </pre> | ist genau dasselbe wie | <pre> for (i = 1; i <= 10; i = i + 1) printf ("%d\n", i); </pre> |
| | | (Datei: loop-2.c) |

Achtung: Zwischen den Klammern nach **for** stehen zwei Semikolons, keine Kommata.

Als eine weitere Schleife kennt C die **do-while**-Schleife:

```

i = 1;
do
{
    printf ("%d\n", i);
    i = i + 1;
}
while (i <= 10)

```

Der Unterschied zur „normalen“ **while**-Schleife besteht darin, daß eine **do-while**-Schleife mindestens einmal ausgeführt wird, weil die Bedingung nicht bereits am Anfang, sondern erst am Ende des Schleifendurchlaufs geprüft wird.

Zwischen einer „normalen“ **while**-Schleife und einer **for**-Schleife besteht hingegen *kein* Unterschied. Insbesondere ist eine Schreibweise wie

```

for (i = 1; 10; i + 1)
    printf ("%d\n", i);

```

zwar zulässiges C, aber nicht sinnvoll (Datei: loop-4.c). Dies kann man sofort erkennen, indem man die **for**-Schleife in eine **while**-Schleife übersetzt:

```

i = 1;
while (10)
{
    printf ("%d\n", i);
    i + 1;
}

```


Dieses Programmfragment setzt einmalig `i` auf den Wert 1 und springt danach in eine Endlosschleife zur Ausgabe von `i`. (Die `while`-Bedingung `10` ist ungleich Null, hat also stets den Wahrheitswert „wahr“.) Am Ende jedes Schleifendurchlaufs wird `i + 1` berechnet; der berechnete Wert wird jedoch nirgendwo verwendet, sondern schlichtweg verworfen. Insbesondere ändert `i` seinen Wert nicht.

2.7 Seiteneffekte

Das Verwerfen berechneter Werte verdient eine nähere Betrachtung – insbesondere in der Programmiersprache C. Wie das Beispielprogramm `statements-1.c` illustriert,

```
#include <stdio.h>
```

```
int main (void)
{
    2 + 2;
    return 0;
}
```

ist es anscheinend zulässig, Werte als Anweisung zu verwenden.

Grundsätzlich gilt in C: Man kann jeden gültigen Ausdruck als Anweisung verwenden. Der Wert des Ausdrucks wird dabei ignoriert.

Die Bedeutung der (gültigen!) C-Anweisung `2 + 2`; lautet somit: „Berechne den Wert `2 + 2` und vergiß ihn wieder.“

Tatsächlich gilt dasselbe auch für `printf()`: Die Funktion `printf()` liefert eine ganze Zahl zurück. Der `printf()`-Aufruf ist somit ein Ausdruck, dessen Wert ignoriert wird.

„Nebenbei“ hat `printf()` aber noch eine weitere Bedeutung, nämlich die Ausgabe des Textes auf dem Standardausgabegerät (Bildschirm). Diese weitere Bedeutung heißt *Seiteneffekt* des Ausdrucks.

Das Beispielprogramm `statements-3.c` gibt den vom ersten `printf()` zurückgegebenen Wert mit Hilfe eines zweiten `printf()` aus:

```
#include <stdio.h>
```

```
int main (void)
{
    int x;
    x = printf ("%d\n", 2 + 2);
    printf ("%d\n", x);
    return 0;
}
```

Die Ausgabe lautet:

```
4
2
```

Bei dem von `printf()` zurückgegebenen Wert handelt es sich um die Anzahl der geschriebenen Zeichen. In diesem Fall ist es zwei Zeichen, nämlich die Ziffer `4` sowie das Zeilenendesymbol, im Programm als `\n` notiert.

Auch Operatoren können in C Seiteneffekte haben.

- Der binäre Operator `=` (Zuweisung) hat als Seiteneffekt die Zuweisung des zweiten Operanden an den ersten Operanden und als Rückgabewert den zugewiesenen Wert.
(Siehe das Beispielprogramm `side-effects-5.c`.)
- Ähnlich funktionieren die binären Operatoren `+=` `-=` `*=` `/=` `%=`. Sie wenden die vor dem `=` stehende Rechenoperation auf die beiden Operanden an, weisen als Seiteneffekt das Ergebnis dem ersten Operanden zu und geben das Rechenergebnis als Wert zurück.

- Die binären Rechnoperatoren `+` `-` `*` `/` `%` und Vergleichsoperatoren `==` `!=` `<` `>` `<=` `>=` haben *keinen* Seiteneffekt.
- Der unäre Rechenoperator `-` (arithmetische Negation, Vorzeichen) hat ebenfalls *keinen* Seiteneffekt.
- Ein weiterer unärer Operator *ohne* Seiteneffekt ist die logische Negation, in C ausgedrückt durch ein Ausrufezeichen: `!`
`!a` ist 1, wenn `a` den Wert 0 hat; ansonsten ist es 0.
`!(a < b)` ist demzufolge dasselbe wie `a >= b`.
- Der Funktionsaufruf `()` (Klammerpaar) ist in C ebenfalls ein unärer Operator. Er liefert einen Wert zurück (Rückgabewert der Funktion) und hat einen Seiteneffekt (Aufruf der Funktion).
- Die unären Operatoren `++` und `--` haben den Seiteneffekt, daß sie die Variable, vor oder hinter der sie stehen, um 1 erhöhen (`++`) bzw. vermindern (`--`). Wenn der Operator *vor* der Variablen steht (`++a`), ist der Rückgabewert der um 1 erhöhte/verminderte Wert der Variablen. Wenn er hingegen *hinter* der Variablen steht (`a++`), ist der Rückgabewert der ursprüngliche Wert der Variablen; das Erhöhen/Vermindern findet in diesem Fall erst danach statt.
 (Siehe die Beispielprogramme [side-effects-1.c](#) bis [side-effects-5.c](#).)
 Da die Reihenfolge, in der ein Ausdruck ausgewertet wird, nicht immer festliegt, sollte man darauf achten, daß die Seiteneffekte eines Ausdruck dessen Wert nicht beeinflussen. (Siehe die Beispielprogramme [side-effects-10.c](#) und [side-effects-11.c](#). `gcc` warnt in derartigen Fällen.)
- Ein weiterer binärer Operator *ohne* Seiteneffekt ist das Komma. Der Ausdruck `a, b` bedeutet: „Berechne `a`, vergiß es wieder, und gib stattdessen `b` zurück.“ Dies ist nur dann sinnvoll, wenn der Ausdruck `a` einen Seiteneffekt hat.

Die folgenden vier Programmfragmente sind verschiedene Schreibweisen für genau denselben Code.

```
int i;

i = 0;
while (i < 10)
{
    printf ("%d\n", i);
    i += 1;
}

for (i = 0; i < 10; i++)
    printf ("%d\n", i);

i = 0;
while (i < 10)
    printf ("%d\n", i++);

for (i = 0; i < 10; printf ("%d\n", i++));
```

Sie bewirken nicht nur dasselbe (Ausgabe der Zahlen von 0 bis 9), sondern stehen tatsächlich für *genau dasselbe Programm*. Sie laufen genau gleich schnell und unterscheiden sich nur hinsichtlich ihrer Lesbarkeit, wobei es vom persönlichen Geschmack abhängt, welche Variante man jeweils als lesbarer empfindet.

**Schreiben Sie Ihre Programme stets so lesbar wie möglich.
Platzsparende Schreibweise macht ein Programm nicht schneller.**

2.8 Strukturierte Programmierung

Bei den bisher vorgestellten Verzweigungen und Schleifen ist die Reihenfolge, in der die Befehle abgearbeitet werden, klar erkennbar. Darüberhinaus kennt C auch Anweisungen, die einen Sprung des Programms bewirken, der diese Struktur durchbricht:

- Mit der **break**-Anweisung kann das Programm die nächstäußere **while**- oder **for**-Schleife unmittelbar verlassen.

Das folgende Beispielprogramm zählt von 0 bis 9, indem es eine Endlosschleife beim Erreichen von 10 mittels **break** unterbricht. Der Schleifenzähler **i** wird innerhalb des **printf()** „nebenbei“ inkrementiert.

```
int i = 0;
while (1)
{
    if (i >= 10)
        break;
    printf ("%d\n", i++);
}
```

Eine übersichtlichere Schreibweise derselben Schleife lautet:

```
int i;
for (i = 0; i < 10; i++)
    printf ("%d\n", i++);
```

(Der erzeugte Code ist in beiden Fällen genau derselbe.)

- Mit der **continue**-Anweisung springt ein Programm unmittelbar in den nächsten Durchlauf der nächst-äußeren Schleife.
- Mit der **return**-Anweisung kann man eine Funktion (siehe Abschnitt 2.9) ohne Umweg direkt verlassen.
- Mit der **goto**-Anweisung springt ein Programm direkt an einen *Label*. Dieser besteht aus einem Namen, gefolgt von einem Doppelpunkt.

```
int i = 0;
loop:
    if (i >= 10)
        goto endloop;
    printf ("%d\n", i++);
    goto loop;
endloop:
```

Ein Programmquelltext sollte immer so gestaltet werden, daß er den Ablauf des Programms unmittelbar ersichtlich macht. Ein vorzeitiges **return** stellt einen „Hinterausgang“ einer Funktion dar und sollte mit Bedacht eingesetzt werden.

Ähnliches gilt in noch stärkerem Maße für **break** und **continue** als „Hinterausgänge“ von Schleifen. Diese sind sicherlich bequeme Möglichkeiten, zusätzliche **ifs** und zusätzliche Wahrheitswert-Variable zu vermeiden, verschleiern aber langfristig den Ablauf der Befehle.

In besonderem Maße gilt dies für die **goto**-Anweisung. Hier ist nicht erkennbar, ob der Sprung nach oben geht (Schleife) oder nach unten (Verzweigung). Verschachtelungen von Blöcken und **goto**-Sprüngen bereiten dem Compiler zusätzliche Arbeit und stehen somit der Optimierung entgegen. (Es stimmt insbesondere nicht, daß Konstruktionen mit **goto** schneller abgearbeitet würden als Konstruktionen mit **if** und **while**.) Es ist daher besser, **goto** nicht zu verwenden und stattdessen den Programmablauf mit Hilfe von Verzweigungen und Schleifen zu strukturieren. (Siehe auch: <http://xkcd.org/292/>)

Zusammengefaßt:

Verwenden Sie vorzeitiges **return mit Bedacht.**

Verwenden Sie **break und **continue** nur dann,
wenn Sie genau wissen, was Sie tun.**

Verwenden Sie kein **goto.**

2.9 Funktionen

Eine Funktionsdeklaration hat in C die Gestalt:

```
Typ Name ( Parameterliste )
{
    Anweisungen
}
```

Beispielprogramm: [functions-1.c](#)

```
#include <stdio.h>

void foo (int a, int b)
{
    printf ("foo():_a=_%d,_b=_%d\n", a, b);
}

int main (void)
{
    foo (3, 7);
    return 0;
}
```

(Das Wort „foo“ ist eine sog. *metasyntaktische Variable* – ein Wort, das absichtlich nichts bedeutet und für einen beliebig austauschbaren Namen steht.)

Mit dem Funktionsaufruf `foo (3, 7)` stellt das Hauptprogramm der Funktion `foo()` die Parameterwerte 3 für `a` und 7 für `b` zur Verfügung.

Der Rückgabewert der Funktion `foo()` ist vom Typ `void`. Im Gegensatz zu Datentypen wie z. B. `int`, das für ganze Zahlen steht, steht `void` für „nichts“.

Von Ausdrücken zurückgegebene `void`-Werte *müssen* ignoriert werden. (Von Ausdrücken zurückgegebene Werte anderer Typen *dürfen* ignoriert werden.)

Das Hauptprogramm ist in C eine ganz normale Funktion. Dadurch, daß sie den Namen `main` hat, weiß das Betriebssystem, daß es sie bei Programmbeginn aufrufen soll. `main()` kann dann seinerseits weitere Funktionen aufrufen.

Über seinen Rückgabewert (vom Typ `int`) teilt `main()` dem Betriebssystem mit, ob das Programm erfolgreich beendet werden konnte. Der Rückgabewert 0 steht für „Erfolg“; andere Werte stehen für verschiedenartige Fehler.

Je nachdem, wo und wie Variable deklariert werden, sind sie von verschiedenen Stellen im Programm aus zugänglich und/oder verhalten sich unterschiedlich.

Beispielprogramm: [functions-2.c](#)

```
1  #include <stdio.h>
2
3  int a, b = 3;
4
5  void foo (void)
6  {
7      b++;
8      static int a = 5;
9      int b = 7;
10     printf ("foo():_a=_%d,_b=_%d\n", a, b);
11     a++;
12     b++;
13 }
14
15 int main (void)
```

```

16 {
17     printf ("main():_a=_%d,_b=_%d\n", a, b);
18     foo ();
19     printf ("main():_a=_%d,_b=_%d\n", a, b);
20     a = b = 12;
21     printf ("main():_a=_%d,_b=_%d\n", a, b);
22     foo ();
23     printf ("main():_a=_%d,_b=_%d\n", a, b);
24     return 0;
25 }

```

Die Ausgabe dieses Programms lautet:

```

main(): a = 0, b = 3
foo(): a = 5, b = 7
main(): a = 0, b = 4
main(): a = 12, b = 12
foo(): a = 6, b = 7
main(): a = 12, b = 13

```

Erklärung:

- Der erste Aufruf der Funktion `printf()` in Zeile 17 des Programms gibt die Werte der in Zeile 3 deklarierten Variablen aus. Diese lauten 0 für `a` und 3 für `b`.

Weil es sich um sog. *globale Variable* handelt (Die Deklaration steht außerhalb jeder Funktion.), werden diese Variablen *bei Programmbeginn* initialisiert. Für `b` steht der Wert 3 für die Initialisierung innerhalb der Deklaration; für `a` gilt der implizite Wert 0.

- Der zweite Aufruf von `printf()` erfolgt indirekt über die Funktion `foo()`, die ihrerseits vom Hauptprogramm aus aufgerufen wurde (Zeile 18).

Oberhalb des `printf()` (Zeile 10) befinden sich neue Deklarationen für Variable, die ebenfalls `a` (Zeile 8) und `b` heißen (Zeile 9). Diese sog. *lokalen Variablen* werden auf neue Werte initialisiert, die korrekt ausgegeben werden.

Ab den Zeilen 8 und 9 bis zum Ende der Funktion `foo()` sind die in Zeile 3 deklarierten globalen Variablen `a` und `b` nicht mehr zugreifbar.

- Der dritte Aufruf von `printf()` erfolgt wieder direkt durch das Hauptprogramm (Zeile 19).

`a` hat immer noch den Wert 0, weil durch das `a++` in Zeile 11 eine andere Variable inkrementiert wurde, die ebenfalls `a` heißt, nämlich die lokale Variable, die in Zeile 8 deklariert wurde.

Dasselbe gilt für `b` hinsichtlich der Zeile 12. In Zeile 7 jedoch greift die Funktion `foo()` auf die in Zeile 3 deklarierte globale Variable `b` zu, die dadurch den Wert 4 (statt vorher: 3) erhält.

- In Zeile 20 weist das Hauptprogramm beiden in Zeile 3 deklarierten Variablen den Wert 12 zu.

Genauer: Es weist der Variablen `a` den Wert `b = 12` zu. Bei `b = 12` handelt es sich um einen Ausdruck mit Seiteneffekt, nämlich die Zuweisung des Wertes 12 an die Variable `b`. Der Wert des Zuweisungsausdrucks ist ebenfalls 12.

- Der vierte Aufruf von `printf()` erfolgt wieder direkt durch das Hauptprogramm (Zeile 21) und gibt erwartungsgemäß zweimal den Wert 12 aus.

- Der fünfte Aufruf von `printf()` erfolgt wieder indirekt über die Funktion `foo()`, die ihrerseits vom Hauptprogramm aus aufgerufen wurde (Zeile 22).

Die Funktion `foo()` gibt wiederum die Werte der in den Zeilen 8 und 9 deklarierten Variablen aus.

Bei `b` (Zeile 9) handelt es sich um eine *automatische Variable*. Diese ist nur innerhalb des umgebenden Blockes – hier der Funktion `foo()` – bekannt. Sie wird beim Aufruf der Funktion initialisiert und hat daher in Zeile 10 stets den Wert 7, den sie in Zeile 9 bekommen hat.

Die Variable `a` (Zeile 8) ist hingegen als *statisch* (engl. **static**) deklariert. Sie behält ihren Wert zwischen zwei Aufrufen von `foo()`, wird nur zu Programmbeginn initialisiert und ist von außerhalb der Funktion nicht veränderbar.

Ausnahme: Wenn einer anderen Funktion die Adresse der **static**-Variablen bekannt ist, kann diese die Variable über einen Zeiger verändern. Siehe Abschnitt 2.10 sowie das Beispielprogramm [variable-22.c](#).

Da der Anfangswert 5 der Variablen **a** bereits einmal erhöht wurde (Zeile 11), wird der Wert 6 ausgegeben. (Die Zuweisung des Wertes 12 im Hauptprogramm bezog sich auf ein anderes **a**, nämlich das in Zeile 3 deklarierte.)

- Der letzte Aufruf von `printf()` erfolgt wieder direkt durch das Hauptprogramm (Zeile 23).
a hat immer noch den Wert 12, weil durch das `a++` in Zeile 11 eine andere Variable inkrementiert wurde, die ebenfalls **a** heißt, nämlich die, die in Zeile 8 deklariert wurde.
Dasselbe gilt für **b** hinsichtlich der Zeile 12. In Zeile 7 jedoch greift die Funktion `foo()` auf die in Zeile 3 deklarierte Variable **b** zu, die dadurch den Wert 13 (statt vorher: 12) erhält.

2.10 Zeiger

In C können an Funktionen grundsätzlich nur Werte übergeben werden. Vom Funktionsrückgabewert abgesehen, hat eine C-Funktion keine Möglichkeit, dem Aufrufer Werte zurückzugeben (siehe Beispielprogramm [pointers-0.c](#)).

Es ist dennoch möglich, eine C-Funktion aufzurufen, um eine Variable (oder mehrere) auf einen Wert zu setzen. Hierfür übergibt man der Funktion die *Speicheradresse* der Variablen als Wert. Der Wert ist ein *Zeiger* auf die Variable.

Wenn einem Zeiger der unäre Operator `*` vorangestellt wird, ist der resultierende Ausdruck diejenige Variable, auf die der Zeiger zeigt. In Deklarationen wird dasselbe Symbol dem Namen vorangestellt, um anstelle einer Variablen des genannten Typs eine Variable vom Typ „Zeiger auf Variable des genannten Typs“ zu deklarieren. (Das `*`-Symbol wirkt jeweils nur auf den unmittelbar folgenden Bezeichner – siehe die Beispielprogramme [test-1.c](#) und [test-2.c](#).)

Umgekehrt wird der unäre Operator `&` einer Variablen vorangestellt, um einen Ausdruck vom Typ „Zeiger auf Variable dieses Typs“ mit dem Wert „Speicheradresse dieser Variablen“ zu erhalten.

Beispielprogramm: [pointers-1.c](#)

```
#include <stdio.h>

void calc_answer (int *a)
{
    *a = 42;
}

int main (void)
{
    int answer;
    calc_answer (&answer);
    printf ("The_answer_is_%.d.\n", answer);
    return 0;
}
```

Die Funktion `calc_answer()` läßt sich vom Hauptprogramm einen Zeiger **a** auf die lokale Variable **answer** des Hauptprogramms übergeben. (Aus Sicht des Hauptprogramms ist dieser Zeiger die Adresse `&answer` der lokalen Variablen **answer**.) Sie schreibt einen Wert in die Variable `*a`, auf die der Zeiger **a** zeigt. Das Hauptprogramm kann diesen Wert anschließend seiner Variablen **answer** entnehmen und mit `printf()` ausgeben.

Vergißt man beim Aufruf den Adreßoperator `&`, übergibt man den aktuellen Wert der Variablen (hier: eine Zahl) anstelle eines Zeigers (und erhält eine Warnung durch den Compiler). Dieser Wert wird als eine Speicheradresse interpretiert. Diese befindet sich in der Regel außerhalb des Bereichs, den das Betriebssystem dem Programm zugewiesen hat. Ein Versuch der Funktion, auf diese Speicheradresse zuzugreifen, führt dann zum Absturz des Programms (Speicherschutzverletzung – siehe Beispielprogramm [pointers-2.c](#)).

2.11 Arrays und Strings

2.11.1 Arrays

In C ist es möglich, mit einem Zeiger Arithmetik zu betreiben, so daß er nicht mehr auf die ursprüngliche Variable zeigt, sondern auf ihren Nachbarn im Speicher.

Solche Nachbarn gibt es dann, wenn mehrere Variable gleichen Typs gemeinsam angelegt werden. Eine derartige Ansammlung von Variablen gleichen Typs heißt *Array* (Feldvariable, Vektor).

Beispielprogramm: [arrays-4.c](#)

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    int prime[5] = { 2, 3, 5, 7, 11 };
    int *p = prime;
    for (int i = 0; i < 5; i++)
        printf ("%d\n", *(p + i));
    return 0;
}
```

Die initialisierte Variable `prime` ist ein Array von fünf ganzen Zahlen. Der Bezeichner `prime` des Arrays wird als Zeiger auf eine `int`-Variable verwendet. In diesem Sinne sind Arrays und Zeiger in C dasselbe.

`p + i` ist ein Zeiger auf den *i*-ten Nachbarn von `*p`. Durch Dereferenzieren `*(p + i)` erhalten wir den *i*-ten Nachbarn von `*p` selbst.

Da diese Kombination – Zeigerarithmetik mit anschließendem Dereferenzieren – sehr häufig auftritt, stellt C für die Konstruktion `*(p + i)` die Abkürzung `p[i]` zur Verfügung (siehe Beispielprogramm [arrays-5.c](#)).

Die von anderen Sprachen her bekannte Schreibweise `p[i]` für das *i*-te Element eines Arrays `p` ist also in C lediglich eine Abkürzung für `*(p + i)`, wobei man `p` gleichermaßen als Array wie als Zeiger auffassen kann.

Wenn wir uns dieser Schreibweise bedienen und anstelle des Zeigers `p`, der durchgehend den Wert `prime` hat, direkt `prime` verwenden, erhalten wir das Beispielprogramm [arrays-5.c](#):

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    int prime[5] = { 2, 3, 5, 7, 11 };
    int *p = prime;
    for (int i = 0; i < 5; i++)
        printf ("%d\n", p[i]);
    return 0;
}
```

Achtung: C prüft *nicht*, ob der Array-Index innerhalb des zulässigen Bereichs liegt, ob also der durch Addition des Index auf die Array-Adresse erhaltene Zeiger noch auf eine Adresse innerhalb des Arrays zeigt.

Übergelaufene Indizes führen nicht immer sofort zum Absturz des Programms, sondern können z. B. andere Variablen des Programms überschreiben (siehe Beispielprogramm [arrays-13.c](#)). Da derartige Fehler äußerst schwer zu entdecken sind, lohnt es sich, Array-Indices vor ihrer Verwendung mit Hilfe von `if`-Anweisungen „von Hand“ zu prüfen.

2.11.2 Strings

Ein wichtiger Spezialfall ist ein Array, dessen Komponenten den Datentyp `char` haben. In C ist `char` wie `int` eine ganze Zahl; der einzige Unterschied besteht darin, daß der Wertebereich von `char` daran angepaßt ist, ein Zeichen (Buchstabe, Ziffer, Satz- oder Sonderzeichen, engl. character) aufzunehmen. Ein typischer Wertebereich für den Datentyp `char` ist von -128 bis 127 .

Ein Initialisierer für ein Array von `char`-Variablen kann direkt als Folge von Zeichen (Zeichenkette, engl. *String*) mit doppelten Anführungszeichen geschrieben werden. Jedes Zeichen initialisiert eine ganzzahlige

Variable mit seinem ASCII-Wert. An das Ende eines in dieser Weise notierten Array-Initialisierers fügt der Compiler implizit einen Ganzzahl-Initialisierer für den Zahlenwert 0 an. Der Array-Initialisierer "Hello" ist also gleichbedeutend mit { 72, 101, 108, 108, 111, 0 }. (Die 72 steht für ein großes H, die 111 für ein kleines o. Man beachte die abschließende 0 am Ende!)

Ein String in C ist also ein Array von **chars**, also ein Zeiger auf **chars**, also ein Zeiger auf ganze Zahlen, deren Wertebereich daran angepaßt ist, Zeichen aufzunehmen.

Wenn bei der Deklaration eines Arrays die Länge aus dem Initialisierer hervorgeht, braucht diese nicht ausdrücklich angegeben zu werden. In diesem Fall folgt auf den Bezeichner nur das Paar eckiger Klammern und der Initialisierer.

Das Beispielprogramm [strings-1.c](#) zeigt, wie das Array durchlaufen werden kann, bis die Zahl 0 gefunden wird:

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    char hello_world[] = "Hello,_world!\n";
    int i = 0;
    while (hello_world[i] != 0)
        printf ("%d", hello_world[i++]);
    return 0;
}
```

Durch die Formatangabe **%d** wird jedes Zeichen – korrektermaßen – als Dezimalzahl ausgegeben. Wenn wir stattdessen die Formatangabe **%c** verwenden (für *character*), wird für jedes Zeichen – ebenso korrektermaßen – sein Zeichenwert (Buchstabe, Ziffer, ...) ausgegeben (Datei: [strings-2.c](#)):

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    char hello_world[] = "Hello,_world!\n";
    int i = 0;
    while (hello_world[i] != 0)
        printf ("%c", hello_world[i++]);
    return 0;
}
```

Durch Verwendung von Pointer-Arithmetik und Weglassen der überflüssigen Abfrage **!= 0** erhalten wir das äquivalente Beispielprogramm [strings-3.c](#):

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    char hello_world[] = "Hello,_world!\n";
    char *p = hello_world;
    while (*p)
        printf ("%c", *p++);
    return 0;
}
```

Dieses ist die in C übliche Art, eine Schleife zu schreiben, die nacheinander alle Zeichen in einem String bearbeitet.

Eine weitere Formatangabe **%s** dient in **printf()** dazu, direkt einen kompletten String bis ausschließlich der abschließenden 0 auszugeben.

Beispielprogramm: [strings-4.c](#)

```
#include <stdio.h>
```



```
int main (void)
{
    char *p = "Hello,_world!";
    printf ("%s\n", p);
    return 0;
}
```

Anstatt als Array, das dann einem Zeiger zugewiesen wird, deklarieren wir die Variable `hello_world` direkt als Zeiger. Dies ist die in C übliche Art, mit String-Konstanten umzugehen.

Allein die Formatspezifikation entscheidet darüber, wie die Parameter von `printf()` bei der Ausgabe dargestellt werden:

| | |
|-----------------|--|
| <code>%d</code> | Der Parameter wird als Zahlenwert interpretiert und dezimal ausgegeben. |
| <code>%x</code> | Der Parameter wird als Zahlenwert interpretiert und hexadezimal ausgegeben. |
| <code>%c</code> | Der Parameter wird als Zahlenwert interpretiert und als Zeichen ausgegeben. |
| <code>%s</code> | Der Parameter wird als Zeiger interpretiert und als Zeichenfolge ausgegeben. |

2.11.3 Parameter des Hauptprogramms

Bisher haben wir das Hauptprogramm `main()` immer in der Form

```
int main (void)
{
    ...
    return 0;
}
```

geschrieben.

Tatsächlich kann das Hauptprogramm vom Betriebssystem Parameter entgegennehmen (Datei: `params-1.c`):

```
#include <stdio.h>

int main (int argc, char **argv)
{
    printf ("argc=_%d\n", argc);
    for (int i = 0; i < argc; i++)
        printf ("argv[%d]_=\"%s\"\n", i, argv[i]);
    return 0;
}
```

Bei der ganzen Zahl `int argc` handelt es sich um die Anzahl der übergebenen Parameter.

`char **argv` ist ein Zeiger auf einen Zeiger, also ein Array von Arrays von `chars`, also ein Array von Strings. Wenn wir es mit einem Index `i` versehen, greifen wir auf den `i`-ten Parameter zu. Der Index `i` läuft, wie in C üblich, von `0` bis `argc - 1`. Das o. a. Beispielprogramm gibt alle übergebenen Parameter auf dem Standardausgabegerät aus:

```
$ gcc -std=c99 -Wall -O params-1.c -o params-1
$ ./params-1 foo bar baz
argc = 4
argv[0] = "./params-1"
argv[1] = "foo"
argv[2] = "bar"
argv[3] = "baz"
```

Genaugenommen übergibt das Betriebssystem dem Programm die gesamte Kommandozeile: Der nullte Parameter ist der Aufruf der ausführbaren Datei selbst – in genau der Weise, in der er eingegeben wurde.

Neben `argc` gibt es noch einen weiteren Mechanismus, mit dem das Betriebssystem dem Programm die Anzahl der übergebenen Parameter mitteilt: Als Markierung für das Ende der Liste wird ein zusätzlicher Zeiger übergeben, der auf „nichts“ zeigt, dargestellt durch die Speicheradresse mit dem Zahlenwert `0`, in C mit `NULL` bezeichnet.

Um die Parameter des Programms in einer Schleife durchzugehen, können wir also entweder von 0 bis `argc - 1` zählen (Schleifenbedingung `i < argc`) oder die Schleife mit dem Erreichen der Endmarkierung abbrechen (Schleifenbedingung `argv[i] != NULL`).

```
#include <stdio.h>

int main (int argc, char **argv)
{
    printf ("argc = %d\n", argc);
    for (int i = 0; argv[i] != NULL; i++)
        printf ("argv[%d] = \"%s\"\n", i, argv[i]);
    return 0;
}
```

Auch für Zeiger gilt: `NULL` entspricht dem Wahrheitswert „falsch“; alles andere dem Wahrheitswert „wahr“. Wir dürfen die Schleifenbedingung also wie folgt abkürzen (Datei: `params-2.c`):

```
#include <stdio.h>

int main (int argc, char **argv)
{
    printf ("argc = %d\n", argc);
    for (char **p = argv; *p; p++)
        printf ("argv[p] = \"%s\"\n", *p);
    return 0;
}
```

2.12 Strukturen

In vielen Situationen ist es sinnvoll, mehrere Variable zu einer Einheit zusammenzufassen.

Das folgende Beispielprogramm `structs-1.c` faßt drei Variable `day`, `month` und `year` zu einem einzigen – neuen – Datentyp `date` zusammen:

```
#include <stdio.h>

typedef struct
{
    char day, month;
    int year;
} date;

int main (void)
{
    date today = { 11, 4, 2012 };
    printf ("%d.%d.%d\n", today.day, today.month, today.year);
    return 0;
}
```

neuer Datentyp: date

Variable deklarieren und initialisieren

Zugriff auf die Komponente day der strukturierten Variablen today

(Zur Erinnerung: Der Datentyp `char` steht für Zahlen, die mindestens die Werte von -128 bis 127 annehmen können. C unterscheidet nicht zwischen Zahlen und darstellbaren Zeichen.)

Eine wichtige Anwendung derartiger *strukturierter Datentypen* besteht darin, zusammengehörige Daten als Einheit an Funktionen übergeben zu können (Beispielprogramm: `structs-2.c`):

```
#include <stdio.h>

typedef struct
{
    char day, month;
    int year;
}
```

```

date;

void set_date (date *d)
{
    (*d).day = 11;
    (*d).month = 4;
    (*d).year = 2012;
}

int main (void)
{
    date today;
    set_date (&today);
    printf ("%d.%d.%d\n", today.day,
            today.month, today.year);
    return 0;
}

```

Die Funktion `set_date()` hat die Aufgabe, eine `date`-Variable mit Werten zu füllen (sog. *Setter*-Funktion). Damit dies funktionieren kann, übergibt das Hauptprogramm an die Funktion einen Zeiger auf die strukturierte Variable. Über diesen Zeiger kann die Funktion dann auf alle Komponenten der Struktur zugreifen. (Die Alternative wäre gewesen, für jede Komponente einen separaten Zeiger zu übergeben.)

Da die Zeigerdereferenzierung `*foo` mit anschließendem Komponentenzugriff `(*foo).bar` eine sehr häufige Kombination ist, kennt C hierfür eine Abkürzung: `foo->bar`

Beispielprogramm: `structs-3.c`

```

#include <stdio.h>

typedef struct
{
    char day, month;
    int year;
}
date;

void set_date (date *d)
{
    d->day = 11;
    d->month = 4;
    d->year = 2012;
}

int main (void)
{
    date today;
    set_date (&today);
    printf ("%d.%d.%d\n", today.day,
            today.month, today.year);
    return 0;
}

```

Aufgabe

Schreiben Sie eine Funktion `inc_date (date *d)` die ein gegebenes Datum `d` unter Beachtung von Schaltjahren auf den nächsten Tag setzt.

Lösung

Wir lösen die Aufgabe über den sog. *Top-Down-Ansatz* („vom Allgemeinen zum Konkreten“). Als besonderen Trick approximieren wir unfertige Programmteile zunächst durch einfachere, fehlerbehaftete. Diese

fehlerhaften Programmteile sind in den untenstehenden Beispielen rot markiert. (In der Praxis würde man diese Zeilen unmittelbar durch die richtigen ersetzen; die fehlerhaften „Platzhalter“ sollten also jeweils nur für Sekundenbruchteile im Programm stehen. Falls man einmal tatsächlich einen Platzhalter für mehrere Sekunden oder länger stehen lassen sollte – z. B., weil an mehreren Stellen Änderungen notwendig sind –, sollte man ihn durch etwas Uncompilierbares (z. B. `@@@`) markieren, damit man auf jeden Fall vermeidet, ein fehlerhaftes Programm auszuliefern.)

Zunächst kopieren wir das Beispielprogramm [structs-3.c](#) und ergänzen den Aufruf der – noch nicht existierenden – Funktion `inc_date()` (Datei: [incdate-0.c](#)):

```
#include <stdio.h>

typedef struct
{
    char day, month;
    int year;
}
date;

void set_date (date *d)
{
    d->day = 31;
    d->month = 1;
    d->year = 2012;
}

int main (void)
{
    date today;
    set_date (&today);
    inc_date (&today);
    printf ("%d.%d.%d\n", today.day, today.month, today.year);
    return 0;
}
```

Als nächstes kopieren wir innerhalb des Programms die Funktion `get_date()` als „Schablone“ für `inc_date()`:

```
void get_date (date *d)
{
    d->day = 31;
    d->month = 1;
    d->year = 2012;
}

void inc_date (date *d)
{
    d->day = 31;
    d->month = 1;
    d->year = 2012;
}
```

Da die Funktion jetzt existiert, ist der Aufruf nicht mehr fehlerhaft. Stattdessen haben wir jetzt eine fehlerhafte Funktion `inc_date()`.

Im nächsten Schritt ersetzen wir die fehlerhafte Funktion durch ein simples Hochzählen der `day`-Komponente (Datei: [incdate-1.c](#))

```
void inc_date (date *d)
{
    d->day += 1; /* FIXME */
}
```

Diese naive Vorgehensweise versagt, sobald wir den Tag über das Ende des Monats hinauszählen. Dies reparieren wir im nächsten Schritt, wobei wir für den Moment inkorrekterweise annehmen, daß alle Monate 30 Tage hätten und das Jahr beliebig viele Monate. (Datei: [incdate-2.c](#)):

```
void inc_date (date *d)
{
    d->day++;
    if (d->day > 31) /* FIXME */
    {
        d->month++; /* FIXME */
        d->day = 1;
    }
}
```

Zunächst reparieren wir den Fehler, der am Ende des Jahres entsteht (Datei: [incdate-3.c](#)).

```
void inc_date (date *d)
{
    d->day++;
    if (d->day > 31) /* FIXME */
    {
        d->month++;
        d->day = 1;
        if (d->month > 12)
        {
            d->year++;
            d->month = 1;
        }
    }
}
```

Das Problem der unterschiedlich langen Monate gehen wir wieder stufenweise an. Zunächst ersetzen wir die Konstante 31 durch eine Variable `days_in_month`. (Datei: [incdate-4.c](#))

```
void inc_date (date *d)
{
    d->day++;
    int days_in_month = 31; /* FIXME */
    if (d->day > days_in_month)
    {
        d->month++;
        d->day = 1;
        if (d->month > 12)
        {
            d->year++;
            d->month = 1;
        }
    }
}
```

Anschließend reparieren wir den fehlerhaften (konstanten) Wert der Variablen, wobei wir zunächst das Problem der Schaltjahre aussparen (Datei: [incdate-5.c](#)):

```

void inc_date (date *d)
{
    d->day++;
    int days_in_month = 31;
    if (d->month == 2)
        days_in_month = 28; /* FIXME */
    else if (d->month == 4 || d->month == 6 || d->month == 9 || d->month == 11)
        days_in_month = 30;
    if (d->day > days_in_month)
    {
        d->month++;
        d->day = 1;
        if (d->month > 12)
        {
            d->year++;
            d->month = 1;
        }
    }
}

```

Auf dieselbe Weise lagern wir das Problem „Schaltjahr oder nicht?“ in eine Variable aus. Diese ist wieder zunächst konstant (Datei: [incdate-6.c](#)):

```

void inc_date (date *d)
{
    d->day++;
    int days_in_month = 31;
    if (d->month == 2)
    {
        int is_leap_year = 1; /* FIXME */
        if (is_leap_year)
            days_in_month = 29;
        else
            days_in_month = 28;
    }
    else if (d->month == 4 || d->month == 6 || d->month == 9 || d->month == 11)
        days_in_month = 30;
    if (d->day > days_in_month)
    {
        d->month++;
        d->day = 1;
        if (d->month > 12)
        {
            d->year++;
            d->month = 1;
        }
    }
}

```

Als nächstes ergänzen wir die Vier-Jahres-Regel für Schaltjahre (Datei [incdate-7.c](#)):

```

    int is_leap_year = 0;
    if (d->year % 4 == 0)
        is_leap_year = 1; /* FIXME */
    if (is_leap_year)
        days_in_month = 29;
    else
        days_in_month = 28;

```

Das nun vorliegende Programm arbeitet bereits für den julianischen Kalender sowie für alle Jahre von 1901 bis 2099 korrekt, nicht jedoch für z. B. das Jahr 2100 (Datei: [incdate-8.c](#)). Damit das Programm für den aktuell verwendeten gregorianischen Kalender korrekt arbeitet, ergänzen wir noch die Ausnahme, daß durch 100 teilbare Jahre keine Schaltjahre sind, sowie die Ausnahme von der Ausnahme, daß durch 400 teilbare Jahre (z. B. das Jahr 2000) eben doch Schaltjahre sind (Datei: [incdate-9.c](#)):

```
int is_leap_year = 0;
if (d->year % 4 == 0)
{
    is_leap_year = 1;
    if (d->year % 100 == 0)
    {
        is_leap_year = 0;
        if (d->year % 400 == 0)
            is_leap_year = 1;
    }
}
if (is_leap_year)
    days_in_month = 29;
else
    days_in_month = 28;
```

Damit ist die Aufgabe gelöst. Der vollständige Quelltext der Lösung (Datei: [incdate-9.c](#)) lautet:

```
#include <stdio.h>

typedef struct
{
    char day, month;
    int year;
}
date;

void set_date (date *d)
{
    d->day = 28;
    d->month = 2;
    d->year = 2000;
}

void inc_date (date *d)
{
    d->day++;
    int days_in_month = 31;
    if (d->month == 2)
    {
        int is_leap_year = 0;
        if (d->year % 4 == 0)
        {
            is_leap_year = 1;
            if (d->year % 100 == 0)
            {
                is_leap_year = 0;
                if (d->year % 400 == 0)
                    is_leap_year = 1;
            }
        }
        if (is_leap_year)
            days_in_month = 29;
        else
            days_in_month = 28;
    }
    else if (d->month == 4 || d->month == 6 || d->month == 9 || d->month == 11)
```

```

        days_in_month = 30;
        if (d->day > days_in_month)
        {
            d->month++;
            d->day = 1;
            if (d->month > 12)
            {
                d->year++;
                d->month = 1;
            }
        }
    }

int main (void)
{
    date today;
    set_date (&today);
    inc_date (&today);
    printf ("%d.%d.%d\n", today.day, today.month, today.year);
    return 0;
}

```

Bemerkungen:

- Der Top-Down-Ansatz ist eine bewährte Methode, um eine zunächst komplexe Aufgabe in handhabbare Teilaufgaben zu zerlegen. Dies hilft ungemein, in längeren Programmen (mehrere Zehntausend bis Millionen Zeilen) die Übersicht zu behalten.
- Der Trick mit dem zunächst fehlerhaften Code hat den Vorteil, daß man jeden Zwischenstand des Programms compilieren und somit austesten kann. Er birgt andererseits die Gefahr in sich, die Übersicht über den fehlerhaften Code zu verlieren, so daß es dieser bis in die Endfassung schafft. Neben dem bereits erwähnten Trick uncompilerbarer Symbole haben sich hier Kommentare wie */*FIXME*/* bewährt, auf die man seinen Code vor der Auslieferung der Endfassung noch einmal automatisch durchsuchen läßt.

3 Bibliotheken

3.1 Der Präprozessor

Der erste Schritt beim Compilieren eines C-Programms ist das Auflösen der sogenannten Präprozessor-Direktiven und -Macros.

```
#include <stdio.h>
```

bewirkt, daß aus Sicht des Compilers anstelle der Zeile der Inhalt der Datei `stdio.h` im C-Quelltext erscheint. Dies ist zunächst unabhängig von Bibliotheken und auch nicht auf die Programmiersprache C beschränkt.

Beispiel: Die Datei `maerchen.c` enthält:

```

Vor langer, langer Zeit
gab es einmal
#include "hexe.h"
Die lebte in einem Wald.

```

Die Datei `hexe.h` enthält:

```
eine kleine Hexe.
```

Der Aufruf

```
$ gcc -E -P maerchen.c
```

produziert die Ausgabe


```
Vor langer, langer Zeit
gab es einmal
eine kleine Hexe.
Die lebte in einem Wald.
```

Mit der Option `-E` weisen wir `gcc` an, nicht zu compilieren, sondern nur den Präprozessor aufzurufen. Die Option `-P` unterdrückt Herkunftsangaben, die normalerweise vom Compiler verwendet werden, um Fehlermeldungen den richtigen Zeilen in den richtigen Dateien zuordnen zu können. Ohne das `-P` lautet die Ausgabe:

```
# 1 "maerchen.c"
# 1 "<built-in>"
# 1 "<command-line>"
# 1 "maerchen.c"
Vor langer, langer Zeit
gab es einmal
# 1 "hexe.h" 1
eine kleine Hexe.
# 3 "maerchen.c" 2
Die lebte in einem Wald.
```

Nichts anderes geschieht, wenn man das klassische `hello.c` compiliert:

```
#include <stdio.h>

int main (void)
{
    printf ("Hello,_world!\n");
    return 0;
}
```

Die Datei `stdio.h` ist wesentlich länger als `hexe.txt` in dem o. a. Beispiel, und sie ruft weitere Include-Dateien auf, so daß wir insgesamt auf über 1000 Zeilen Quelltext kommen. Die spitzen Klammern anstelle der Anführungszeichen bedeuten, daß es sich um eine *Standard-Include-Datei* handelt, die nur in den Standard-Include-Verzeichnissen gesucht werden soll, nicht jedoch im aktuellen Verzeichnis.

3.2 Bibliotheken einbinden

Tatsächlich ist von den über 1000 Zeilen aus `stdio.h` nur eine einzige relevant, nämlich:

```
extern int printf (__const char *__restrict __format, ...);
```

Dies ist die Deklaration einer Funktion, die sich von einer „normalen“ Funktionsdefinition nur wie folgt unterscheidet:

- Die Parameter `__const char *__restrict __format, ...` heißen etwas ungewöhnlich.
- Der Funktionskörper `{ ... }` fehlt. Stattdessen folgt auf die Kopfzeile direkt ein Semikolon `;`.
- Der Deklaration ist das Schlüsselwort `extern` vorangestellt.

Dies bedeutet für den Compiler: „Es gibt diese Funktion und sie sieht aus, wie beschrieben. Benutze sie einfach, und kümmere dich nicht darum, wer die Funktion schreibt.“

Wenn wir tatsächlich nur `printf()` benötigen, können wir also die Standard-Datei `stdio.h` durch eine eigene ersetzen, die nur die o. a. Zeile `extern int printf (...)` enthält. (Dies ist in der Praxis natürlich keine gute Idee, weil nur derjenige, der die Funktion `printf()` geschrieben hat, den korrekten Aufruf kennt. In der Praxis sollten wir immer diejenige Include-Datei benutzen, die gemeinsam mit der tatsächlichen Funktion ausgeliefert wurde.)

Der Präprozessor kann nicht nur **#include**-Direktiven auflösen. Mit **#define** kann man sog. *Makros* definieren, die bei Benutzung durch einen Text ersetzt werden. Auf diese Weise kann man *Konstante* definieren.

Beispiel: [higher-math-1.c](#)

```
#include <stdio.h>

#define VIER 4

int main (void)
{
    printf ("2_+_2_=_%d\n", VIER);
    return 0;
}
```

Genau wie bei **#include** nimmt der Präprozessor auch bei **#define** eine rein textuelle Ersetzung vor, ohne sich um den Sinn des Ersetzten zu kümmern.

Beispiel: [higher-math-2.c](#)

```
#include <stdio.h>

#define wuppdich printf
#define holla main
#define pruzzel return
#define VIER 4

int holla (void)
{
    wuppdich ("2_+_2_=_%d\n", VIER);
    pruzzel 0;
}
```

Dies kann zu Problemen führen, sobald Berechnungen ins Spiel kommen.

Beispiel: [higher-math-4.c](#)

```
#include <stdio.h>

#define VIER 2 + 2

int main (void)
{
    printf ("2_+_3_*_4_=_%d\n", 2 + 3 * VIER);
    return 0;
}
```

Hier z. B. sieht man mit `gcc -E rechnen.c`, daß die Ersetzung des Makros **VIER** wie folgt lautet:

```
printf ("2_+_3_*_4_=_%d\n", 2 + 3 * 2 + 2);
```

Der C-Compiler wendet die Regel „Punktrechnung geht vor Strichrechnung“ an und erfährt überhaupt nicht, daß das `2 + 2` aus einem Makro entstanden ist.

Um derartige Effekte zu vermeiden, setzt man arithmetische Operationen innerhalb von Makros in Klammern.

Beispiel: [higher-math-5.c](#)

```
#define VIER (2 + 2)
```

(Es ist in den meisten Situationen üblich, Makros in **GROSSBUCHSTABEN** zu benennen, um darauf hinzuweisen, daß es sich eben um einen Makro handelt.)

Achtung: Hinter Makro-Deklaration kommt üblicherweise *kein* Semikolon.

Wenn man ein Semikolon setzt, gehört dies mit zum Ersetzungstext des Makros. Dies ist grundsätzlich zulässig, führt aber zu sehr seltsamen C-Quelltexten – siehe z. B. [higher-math-6.c](#).

Das nächste Beispiel illustriert, wie man Bibliotheken schreibt und verwendet.

Es besteht aus drei Quelltexten:

philosophy.c:

```
#include <stdio.h>
#include "answer.h"

int main (void)
{
    printf ("The_answer_is_%d.\n", answer ());
    return 0;
}
```

answer.c:

```
int answer (void)
{
    return 42;
}
```

answer.h:

```
extern int answer (void);
```

Das Programm `philosophy.c` verwendet eine Funktion `answer()`, die in der Datei `answer.h` extern deklariert ist.

Der „normale“ Aufruf

```
$ gcc -Wall -O philosophy.c -o philosophy
```

liefert die Fehlermeldung:

```
/tmp/ccr4Njg7.o: In function 'main':
philosophy.c:(.text+0xa): undefined reference to 'answer'
collect2: ld returned 1 exit status
```

Diese stammt nicht vom Compiler, sondern vom *Linker*. Das Programm ist syntaktisch korrekt und wird auch korrekt in eine Binärdatei umgewandelt (hier: `/tmp/ccr4Njg7.o`). Erst beim Zusammenbau („Linken“) der ausführbaren Datei (`philosophy`) tritt ein Fehler auf.

Tatsächlich wird die Funktion `answer()` nicht innerhalb von `philosophy.c`, sondern in einer separaten Datei `answer.c`, einer sog. *Bibliothek* definiert. Es ist möglich (und üblich), Bibliotheken separat vom Hauptprogramm zu compilieren. Dadurch spart man sich das Neucompilieren, wenn im Hauptprogramm etwas geändert wurde, nicht jedoch in der Bibliothek.

Mit der Option `-c` weisen wir `gcc` an, nur zu compilieren, jedoch nicht zu linken. Die Aufrufe

```
$ gcc -Wall -O -c philosophy.c
$ gcc -Wall -O -c answer.c
```

produzieren die Binärdateien `philosophy.o` und `answer.o`, die sogenannten *Objekt-Dateien* (daher die Endung `.o` oder `.obj`).

Mit dem Aufruf

```
$ gcc philosophy.o answer.o -o philosophy
```

bauen wir die beiden bereits compilierten Objekt-Dateien zu einer ausführbaren Datei `philosophy` (hier ohne Endung) zusammen.

Es ist auch möglich, im Compiler-Aufruf gleich beide C-Quelltexte zu übergeben:

```
$ gcc -Wall -O philosophy.c answer.c -o philosophy
```

In diesem Fall ruft `gcc` zweimal den Compiler auf (für jede C-Datei einmal) und anschließend den Linker.

3.3 Bibliotheken verwenden (Beispiel: OpenGL)

Die *OpenGL*-Bibliothek dient dazu, unter Verwendung von Hardware-Unterstützung dreidimensionale Grafik auszugeben.

Die einfachste Art und Weise, OpenGL in seinen Programmen einzusetzen, erfolgt über eine weitere Bibliothek, das *OpenGL Utility Toolkit (GLUT)*.

Die Verwendung von OpenGL und GLUT erfolgt durch Einbinden der Include-Dateien

```
#include <GL/gl.h>
#include <GL/glu.h>
#include <GL/glut.h>
```

und die Übergabe der Bibliotheken `-lGL -lGLU -lglut` im Compiler-Aufruf:

```
$ gcc -Wall -O cube.c -lGL -lGLU -lglut -o cube
```

(Dies ist der Aufruf unter Unix. Unter Microsoft Windows ist der Aufruf etwas anders und hängt von der verwendeten Version der GLUT-Bibliothek ab. Für Details siehe die Dokumentation der GLUT-Bibliothek.)

Die Bibliothek stellt uns fertig geschriebene Programmfragmente zur Verfügung, insbesondere:

- Funktionen: z. B. `glutInit (&argc, argv);`
- Konstanten: z. B. `GLUT_RGBA`
- Datentypen: z. B. `GLfloat`

Manche OpenGL-Funktionen erwarten als Parameter ein Array. Dies gilt z. B. beim Setzen von Farben oder beim Positionieren einer Lichtquelle:

```
GLfloat light0_position[] = {1.0, 2.0, -2.0, 1.0};
glLightfv (GL_LIGHT0, GL_POSITION, light0_position);
```

Ein weiteres wichtiges allgemeines Konzept, das in OpenGL eine Rolle spielt, ist die Übergabe einer Funktion an die Bibliothek. Man nennt dies das *Installieren einer Callback-Funktion*.

```
void draw (void)
{ ... }

glutDisplayFunc (draw);
```

Wir übergeben die – von uns geschriebene – Funktion `draw()` an die OpenGL-Funktion `glutDisplayFunc()`. Dies bewirkt, daß OpenGL immer dann, wenn etwas gezeichnet werden soll, `draw()` aufruft. Innerhalb von `draw()` können wir also unsere Zeichenbefehle unterbringen.

Die OpenGL-Bibliothek ist sehr umfangreich und kann im Rahmen dieser Vorlesung nicht im Detail behandelt werden. Um trotzdem damit arbeiten zu können, lagern wir bestimmte Teile – Initialisierung und das Setzen von Farben – in eine eigene Bibliothek `opengl-magic` aus, die wir als „Black Box“ verwenden. Der Compiler-Aufruf lautet dann:

```
$ gcc -Wall -O cube.c -lGL -lGLU -lglut opengl-magic.c -o cube
```

(Wer in eigenen Projekten mehr mit OpenGL machen möchte, ist herzlich eingeladen, die Funktionsweise von `opengl-magic` zu studieren.)

- Das Beispielprogramm `cube-1.c` illustriert, wie man grundsätzlich überhaupt ein geometrisches Objekt zeichnet. In diesem Fall handelt es sich um einen Würfel der Kantenlänge `0.5`, von dem wir nur die Vorderfläche sehen, also ein Quadrat.

```
#include <GL/gl.h>
#include <GL/glu.h>
#include <GL/glut.h>
#include "opengl-magic.h"
```

```

void draw (void)
{
    glClear (GL_COLOR_BUFFER_BIT + GL_DEPTH_BUFFER_BIT);  ← Bildschirm löschen
    set_material_color (1.0, 1.0, 0.0);  ← Rot- und Grünanteil 100 %, Blauanteil 0 %
    glutSolidCube (0.5);  ← Würfel zeichnen
    glFlush ();  ← Zeichnung „abschicken“
}

int main (int argc, char **argv)
{
    init_opengl (&argc, argv, "Cube");
    glutDisplayFunc (draw);  ← Callback-Funktion installieren (s. o.)
    glutMainLoop ();  ← Endlosschleife: Ab jetzt werden nur noch Callbacks aufgerufen.
    return 0;
}

```

- In [cube-2.c](#) kommt eine Drehung um -30 Grad um eine schräge Achse $(0.5, 1.0, 0.0)$ hinzu. Der Würfel ist jetzt als solcher zu erkennen.

Jeder Aufruf von `glRotatef()` bewirkt, daß alle nachfolgenden Zeichenoperationen gedreht ausgeführt werden.

- In [cube-3.c](#) kommt als zusätzliches Konzept eine weitere Callback-Funktion hinzu, nämlich ein *Timer-Handler*. Durch den `glutTimerFunc()`-Aufruf veranlassen wir OpenGL, die von uns geschriebene Funktion `timer_handler()` aufzurufen, sobald 50 Millisekunden vergangen sind.

Innerhalb von `timer_handler()` rufen wir `glutTimerFunc()` erneut auf, was insgesamt zur Folge hat, daß `timer_handler()` periodisch alle 50 Millisekunden aufgerufen wird.

Die „Nutzlast“ der Funktion `timer_handler()` besteht darin, eine Variable `t` um den Wert 0.05 zu erhöhen und anschließend mittels `glutPostRedisplay()` ein Neuzeichnen anzufordern. Dies alles bewirkt, daß die Variable `t` die aktuelle Zeit seit Programmbeginn in Sekunden enthält und daß `draw()` zwanzigmal pro Sekunde aufgerufen wird.

- Weil das Bild während des Neuzeichnens die ganze Zeit zu sehen ist, flackert in [cube-3.c](#) der Bildschirm. Dies wird in [cube-3a.c](#) dadurch behoben, daß die Zeichnung zunächst in einem unsichtbaren Pufferspeicher aufgebaut wird. Erst die fertige Zeichnung wird mit dem Funktionsaufruf `swapBuffers()` sichtbar gemacht.

Damit dies möglich ist, muß beim Initialisieren ein doppelter Puffer angefordert werden. Zu diesem Zweck ersetzen wir die Bibliothek [opengl-magic.c](#) durch [opengl-magic-double.c](#).

Der Compiler-Aufruf lautet dann:

```
$ gcc -Wall -O cube.c -lGL -lGLU -lglut opengl-magic-double.c -o cube
```

Unabhängig davon heißt die Include-Datei weiterhin [opengl-magic.h](#). Dies illustriert, daß der Include-Mechanismus des Präprozessors und der Zusammenbau-Mechanismus des Linkers tatsächlich voneinander unabhängig sind.

(Durch das Austauschen von Bibliotheken, insbesondere bei dynamischen Bibliotheken (Endung `.so` unter Unix bzw. `.dll` unter Microsoft Windows) ist es möglich, das Verhalten bereits fertiger Programme zu beeinflussen, ohne das Programm neu compilieren zu müssen. Dies kann zu Testzwecken geschehen, zur Erweiterung des Funktionsumfangs oder auch zum Einschleusen von Schadfunktionen.)

- In [cube-3a.c](#) dreht sich der Würfel zunächst langsam, dann immer schneller. Dies liegt daran, daß sich jedes `glRotatef()` auf alle nachfolgenden Zeichenbefehle auswirkt, so daß sich sämtliche `glRotatef()` aufaddieren.

Eine Möglichkeit, stattdessen eine gleichmäßige Drehung zu erreichen, besteht darin, den Wirkungsbereich des `glRotatef()` zu begrenzen. Dies geschieht durch Einschließen der Rotation in das Befehls-paar `glPushMatrix()` und `glPopMatrix()`: Durch `glPopMatrix()` wird das System wieder in denjenigen Zustand versetzt, in dem es sich vor dem Aufruf von `glPushMatrix()` befand.

Dies ist in [cube-3b.c](#) (langsame Drehung) und [cube-3c.c](#) (schnelle Drehung) umgesetzt.

Aufgabe

Für welche elementaren geometrischen Körper stellt die GLUT-Bibliothek Zeichenroutinen zur Verfügung?

Lösung

Ein Blick in die Include-Datei `glut.h` verweist uns auf eine andere Include-Datei:

```
#include "freeglut_std.h"
```

Wenn wir darin nach dem Wort `glutSolidCube` suchen, finden wir die Funktionen:

```
glutSolidCube (GLdouble size);  
glutSolidSphere (GLdouble radius, GLint slices, GLint stacks);  
glutSolidCone (GLdouble base, GLdouble height, GLint slices, GLint stacks);  
glutSolidTorus (GLdouble innerRadius, GLdouble outerRadius, GLint sides, GLint rings);  
glutSolidDodecahedron (void);  
glutSolidOctahedron (void);  
glutSolidTetrahedron (void);  
glutSolidIcosahedron (void);  
glutSolidTeapot (GLdouble size);
```

Zu jeder `glutSolid`-Funktion gibt es auch eine `glutWire`-Funktion, beispielsweise `glutWireCube()` als Gegenstück zu `glutSolidCube()`.

In demselben Verzeichnis finden wir auch eine Datei `freeglut_ext.h` mit weiteren Funktionen dieses Typs:

```
glutSolidRhombicDodecahedron (void);  
glutSolidSierpinskiSponge (int num_levels, GLdouble offset[3], GLdouble scale);  
glutSolidCylinder (GLdouble radius, GLdouble height, GLint slices, GLint stacks);
```

Die GLUT-Bibliothek kennt insbesondere standardmäßig eine Funktion zum Zeichnen einer Teekanne und als Erweiterung eine Funktion zum Zeichnen eines Sierpinski-Schwamms.

Die weiteren OpenGL-Beispielprogramme illustrieren den Umgang mit Transformationen.

- Die Beispielprogramme `orbit-1.c` und `orbit-1a.c` illustrieren eine weitere Transformation der gezeichneten Objekte, nämlich die Translation (Verschiebung). Jeder Transformationsbefehl wirkt sich jeweils auf die *danach* erfolgenden Zeichenbefehle aus. Um sich zu veranschaulichen, welche Transformationen auf ein gezeichnetes Objekt wirken (hier z. B. auf `glutSolidSphere()`), muß man die Transformationen in der Reihenfolge *von unten nach oben* ausführen.
- Die Beispielprogramme `orbit-2.c` und `orbit-3.c` verwenden weitere Transformationen und geometrische Objekte, um die Umlaufbahn zweier Kugeln, beispielsweise des Mondes um die Erde, zu illustrieren.
- Das Beispielprogramm `orbit-x.c` schließlich versieht die gezeichneten Objekte „Mond“ und „Erde“ mit realistischen Texturen (NASA-Fotos). Die hierfür notwendigen doch eher komplizierten Funktionsaufrufe wurden wiederum in eine Bibliothek (`textured-spheres`) ausgelagert.

3.4 Projekt organisieren: make

In größeren Projekten ruft man den Compiler (und Präprozessor und Linker) nicht „von Hand“ auf, sondern überläßt dies einem weiteren Programm namens `make`.

`make` sucht im aktuellen Verzeichnis nach einer Datei `Makefile` (ohne Dateiendung). (Normalerweise gibt es nur ein Makefile pro Verzeichnis. Falls es doch mehrere gibt, kann man die Datei, z. B. `Makefile.1`, mit `-f` auch explizit angeben: `make -f Makefile.1`.)

3.4.1 make-Regeln

Ein Makefile enthält sog. Regeln, um Ziele zu erzeugen. Eine Regel beginnt mit der Angabe des Ziels, gefolgt von einem Doppelpunkt und den Dateien (oder anderen Zielen), von denen es abhängt. Darunter steht, mit einem Tabulator-Zeichen eingerückt, der Programmaufruf, der nötig ist, um das Ziel zu bauen.

```
philosophy.o: philosophy.c answer.h
    gcc -c philosophy.c -o philosophy.o
```

Achtung: Ein Tabulator-Zeichen läßt sich optisch häufig nicht von mehreren Leerzeichen unterscheiden. **make** akzeptiert jedoch nur das Tabulator-Zeichen.

Die o. a. Regel bedeutet, daß jedesmal, wenn sich **philosophy.c** oder **answer.h** geändert hat, **make** das Programm **gcc** in der beschriebenen Weise aufrufen soll.

Durch die Kombination mehrerer Regeln lernt **make**, welche Befehle in welcher Reihenfolge aufgerufen werden müssen, je nachdem, welche Dateien geändert wurden.

Beispiel: [Makefile.orbit-x1](#)

Der Aufruf

```
$ make -f Makefile.orbit-x1
```

bewirkt beim ersten Mal:

```
gcc -Wall -O orbit-x1.c opengl-magic-double.c textured-spheres.c \
    -lGL -lGLU -lglut -o orbit-x1
```

Beim zweiten Aufruf stellt **make** fest, daß sich keine der Dateien auf der rechten Seite der Regeln (rechts vom Doppelpunkt) geändert hat und ruft keine Programme auf:

```
make: »orbit-x1« ist bereits aktualisiert.
```

3.4.2 make-Macros

Um wiederkehrende Dinge (typischerweise: Listen von Dateinamen oder Compiler-Optionen) nicht mehrfach eingeben zu müssen, kennt **make** sog. Macros:

```
PHILOSOPHY_SOURCES = philosophy.c answer.h
```

Um den Macro zu expandieren, setzt man ihn in runde Klammern mit einem vorangestellten Dollarzeichen. Die Regel

```
philosophy.o: $(PHILOSOPHY_SOURCES)
    gcc -c philosophy.c -o philosophy.o
```

ist also nur eine andere Schreibweise für:

```
philosophy.o: philosophy.c answer.h
    gcc -c philosophy.c -o philosophy.o
```

Beispiel: [Makefile.blink](#)

Die Beispielprogramme **blink-*.c** sind dafür gedacht, auf einem Mikro-Controller zu laufen. Der Compiler-Aufruf erfordert zusätzliche Optionen (z. B. **-Os -mmcu=atmega32**), und es müssen zusätzliche Entwicklungswerkzeuge (z. B. **avr-objcopy**) aufgerufen werden – ebenfalls mit den richtigen Optionen. Der Prozeß des Zusammenbauens wird durch ein Makefile [Makefile.blink](#) verwaltet.

[Makefile.blink](#) speichert den Namen des Quelltextes (ohne die Endung **.c**) in einem Macro. Durch Ändern allein dieses Macros ist es daher möglich, das Makefile für ein anderes Projekt einzusetzen.

Zusätzlich führt [Makefile.blink](#) eine neue Regel **clean** ein. Diese bewirkt üblicherweise, daß alle automatisch erzeugten Dateien gelöscht werden:

```
clean:
    rm -f $(TARGET).elf $(TARGET).hex
```

Rechts vom Doppelpunkt nach `clean` befinden sich keine Abhängigkeitsdateien. Dies hat zur Folge, daß die Aktion (`rm -f ...`) bei `make clean` grundsätzlich immer ausgeführt wird, also nicht nur, wenn sich irgendeine Datei geändert hat.

Ebenfalls üblich ist eine weitere Regel `install`, die bewirkt, daß die Zieldateien (bei einem Programm typischerweise eine ausführbare Datei, bei einer Bibliothek typischerweise `.a`-, `.so`- sowie `.h`-Dateien) an ihren endgültigen Bestimmungsort kopiert werden.

3.4.3 Fazit: 3 Sprachen

Um in C programmieren zu können, muß man also tatsächlich drei Sprachen lernen:

- C selbst,
- die Präprozessor-Sprache
- und die `make`-Sprache.

Durch Entwicklungsumgebungen wie z. B. `Eclipse` läßt sich der `make`-Anteil teilweise automatisieren. (`Eclipse` z. B. schreibt ein Makefile; andere Umgebungen übernehmen die Funktionalität von `make` selbst.) Auch dort muß man jedoch die zu einem Projekt gehörenden Dateien verwalten.

Wenn sich dann eine Datei nicht an dem Ort befindet, erhält man u. U. wenig aussagekräftige Fehlermeldungen, z. B.:

```
make: *** No rule to make target 'MeinProgramm.elf', needed by 'elf'. Stop.
```

Wenn man dann um die Zusammenhänge weiß („Welche Bibliotheken verwendet mein Programm? Wo befinden sich diese? Und wie erfährt der Linker davon?“), kann man das Problem systematisch angehen und ist nicht auf Herumraten angewiesen.

4 Algorithmen

4.1 Differentialgleichungen

Eine mathematische Gleichung mit einer gesuchten Zahl x , z. B.

$$x + 2 = -x$$

läßt sich leicht nach der Unbekannten x auflösen. (In diesem Fall lautet die Lösung: $x = -1$.)

Wesentlich schwieriger ist es, eine mathematische Gleichung mit einer gesuchten Funktion $x(t)$ zu lösen, z. B.:

$$x'(t) = -x(t) \quad \text{mit} \quad x(0) = 1$$

Um hier auf die Lösung $x(t) = e^{-t}$ zu kommen, sind bereits weitreichende mathematische Kenntnisse erforderlich.

Eine derartige Gleichung, die einen Zusammenhang zwischen der gesuchten Funktion und ihren Ableitungen vorgibt, heißt *Differentialgleichung*. Viele physikalisch-technische Probleme werden durch Differentialgleichungen beschrieben.

4.1.1 Beispiel: Pendelschwingung

Das Verhalten eines Fadenpendels (mathematisches Pendel) wird durch seine Auslenkung ϕ als Funktion der Zeit t beschrieben. Wie kann man $\phi(t)$ berechnen?

Wie aus anderen Veranstaltungen (Grundlagen der Physik, Mechanik) her bekannt sein sollte, wirkt auf ein Fadenpendel, das um den Winkel $\phi(t)$ ausgelenkt ist, die tangentielle Kraft $F = -m \cdot g \cdot \sin \phi(t)$. Gemäß der Formel $F = m \cdot a$ bewirkt diese Kraft eine tangentielle Beschleunigung $a = -g \cdot \sin \phi(t)$. (Das Minuszeichen kommt daher, daß die Kraft der Auslenkung entgegengesetzt wirkt.)

Wenn das Pendel die Länge l hat, können wir dieselbe tangentielle Beschleunigung mit Hilfe der zweiten Ableitung des Auslenkungswinkels $\phi(t)$ berechnen: $a = l \cdot \phi''(t)$ (Winkel in Bogenmaß). Durch Gleichsetzen erhalten wir eine Gleichung, die nur noch eine Unbekannte enthält, nämlich die Funktion $\phi(t)$.

Um $\phi(t)$ zu berechnen, müssen wir also die Differentialgleichung

$$\phi''(t) = -\frac{g}{l} \cdot \sin \phi(t)$$

lösen.

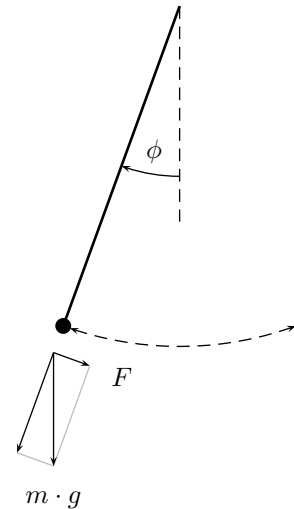
Diese Differentialgleichung läßt sich mit „normalen“ Mitteln nicht lösen, daher verwendet man in der Praxis meistens die Kleinwinkelnäherung $\sin \phi \approx \phi$ (für $\phi \ll 1$) und löst stattdessen die Differentialgleichung:

$$\phi''(t) = -\frac{g}{l} \cdot \phi(t)$$

Für ein mit der Anfangsauslenkung $\phi(0)$ losgelassenes Pendel lautet dann das Ergebnis:

$$\phi(t) = \phi(0) \cdot \cos(\omega t) \quad \text{mit} \quad \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Das Beispielprogramm [pendulum-1.c](#) illustriert, welche Bewegung sich aus diesem $\phi(t)$ ergibt.



4.1.2 Das explizite Euler-Verfahren

Um eine Differentialgleichung mit Hilfe eines Computers näherungsweise *numerisch* zu lösen, stehen zahlreiche Lösungsverfahren zur Verfügung. Im folgenden soll das einfachste dieser Verfahren, das *explizite Euler-Verfahren* (auch *Eulersches Polygonzugverfahren* genannt) vorgestellt werden.

Wir betrachten das System während eines kleinen Zeitintervalls Δt . Während dieses Zeitintervalls sind alle von der Zeit t abhängigen Funktionen – z. B. Ort, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft – näherungsweise konstant.

Bei konstanter Geschwindigkeit v ist es einfach, aus dem Ort $x(t)$ zu Beginn des Zeitintervalls den Ort $x(t + \Delta t)$ am Ende des Zeitintervalls zu berechnen:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta t \cdot v$$

Bei konstanter Kraft $F = m \cdot a$ und somit konstanter Beschleunigung a ist es ebenso einfach, aus der Geschwindigkeit $v(t)$ zu Beginn des Zeitintervalls die Geschwindigkeit $v(t + \Delta t)$ am Ende des Zeitintervalls zu berechnen:

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \Delta t \cdot a$$

Wenn wir dies in einer Schleife durchführen und jedesmal t um Δt erhöhen, erhalten wir Näherungen für die Funktionen $x(t)$ und $v(t)$.

Für das oben betrachtete Beispiel (Fadenpendel) müssen wir in jedem Zeitintervall Δt zunächst die tangentielle Beschleunigung $a(t)$ aus der tangentialen Kraft berechnen, die sich wiederum aus der momentanen Auslenkung $\phi(t)$ ergibt:

$$a = -g \cdot \sin \phi$$

Mit Hilfe dieser – innerhalb des Zeitintervalls näherungsweise konstanten – Beschleunigung berechnen wir die neue tangentielle Geschwindigkeit:

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \Delta t \cdot a$$

Mit Hilfe dieser – innerhalb des Zeitintervalls näherungsweise konstanten – Geschwindigkeit berechnen wir schließlich die neue Winkelauslenkung ϕ , wobei wir einen kleinen Umweg über den Kreisbogen $x = l \cdot \phi$ machen:

$$\phi(t + \Delta t) = \frac{x(t + \Delta t)}{l} = \frac{x(t) + \Delta t \cdot v}{l} = \phi(t) + \frac{\Delta t \cdot v}{l}$$

Ein C-Programm, das diese Berechnungen durchführt (Datei: [pendulum-2.c](#)), enthält als Kernstück:

```
#define g 9.81
#define l 1.0
#define dt 0.05
#define phi0 30.0 /* degrees */

float t = 0.0;
float phi = phi0 * M_PI / 180.0;
float v = 0.0;

void calc (void)
{
    float a = -g * sin (phi);
    v += dt * a;
    phi += dt * v / l;
}
```

Jeder Aufruf der Funktion `calc()` versetzt das Pendel um das Zeitintervall `dt` in die Zukunft.

Es ist vom Verfahren her nicht notwendig, mit der Kleinwinkelnäherung $\sin \phi \approx \phi$ zu arbeiten. Das Beispielprogramm [pendulum-3.c](#) illustriert, welchen Unterschied die Kleinwinkelnäherung ausmacht.

Wie gut arbeitet das explizite Euler-Verfahren? Um dies zu untersuchen, lösen wir eine Differentialgleichung, deren exakte Lösung aus der Literatur bekannt ist, nämlich die Differentialgleichung mit Kleinwinkelnäherung. Das Beispielprogramm [pendulum-4.c](#) vergleicht beide Lösungen miteinander. Für das betrachtete Beispiel ist die Übereinstimmung recht gut; für Präzisionsberechnungen ist das explizite Euler-Verfahren jedoch nicht genau (und stabil) genug. Hierfür sei auf die Lehrveranstaltungen zur numerischen Mathematik verwiesen.

Bemerkung

Das Beispielprogramm [pendulum-4.c](#) berechnet mit überzeugender Übereinstimmung dasselbe Ergebnis für die Auslenkung des Pendels auf zwei verschiedene Weisen:

1. über eine Formel, die einen Cosinus enthält,
2. mit Hilfe der Funktion `calc()`, die nur Grundrechenarten verwendet.

Dies läßt die Natur der Verfahren erahnen, mit deren Hilfe es möglich ist, Sinus, Cosinus und andere kompliziertere Funktionen nur unter Verwendung der Grundrechenarten zu berechnen.

4.2 Rekursion

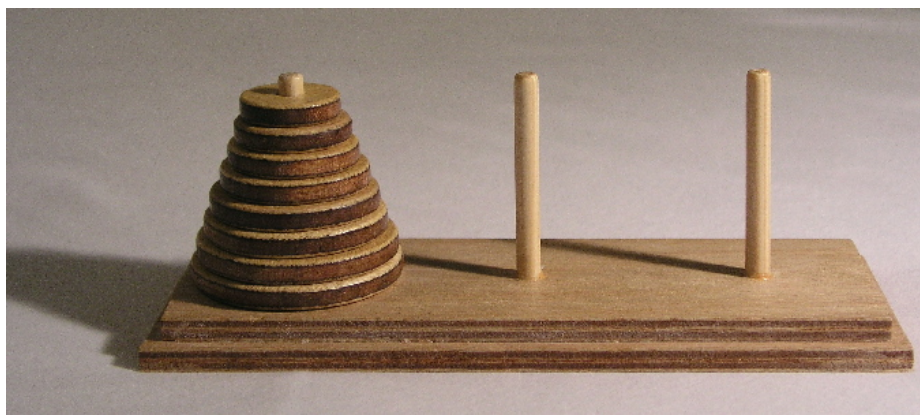
Aus der Mathematik ist das Beweisprinzip der *vollständigen Induktion* bekannt:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Aussage gilt für } n = 1 \\ \text{Schluß von } n - 1 \text{ auf } n \end{array} \right\} \text{ Aussage gilt für alle } n \in \mathbb{N}$$

Wenn auf diese Weise die Lösbarkeit eines Problems bewiesen wurde, ist es direkt möglich, das Problem im Computer *tatsächlich* zu lösen, nämlich durch einen *rekursiven Algorithmus*.

Ein klassisches Beispiel für ein rekursiv lösbares Problem sind die Türme von Hanoi:

- 64 Scheiben, 3 Plätze, immer 1 Scheibe verschieben
- Ziel: Turm verschieben
- Es dürfen nur kleinere Scheiben auf größeren liegen.



Bildquelle: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tower_of_Hanoi.jpeg
Urheber: <http://en.wikipedia.org/wiki/User:Evanherk>
Lizenz: GNU FDL (Version 1.2 oder später) oder
Creative Commons Attribution-Share Alike (Version 3.0 Unported)

Die rekursive Lösung des Problems lautet:

- Wenn $n = 1$ ist, also nur eine Scheibe vorliegt, läßt sich diese „einfach so“ an den Zielplatz verschieben. In diesem Fall sind wir direkt fertig.
- Wenn $n - 1$ Scheiben als verschiebbar vorausgesetzt werden, lautet die Vorgehensweise:
verschiebe die oberen $n - 1$ Scheiben auf einen Hilfsplatz,
verschiebe die darunterliegende einzelne Scheibe auf den Zielplatz,
verschiebe die $n - 1$ Scheiben vom Hilfsplatz auf den Zielplatz.

Dieser Algorithmus läßt sich unmittelbar in eine Programmiersprache übersetzen:

```
void verschiebe (int n, int start, int ziel)
{
    if (n == 1)
        verschiebe_1_scheibe (start, ziel);
    else
    {
        verschiebe (1, start, hilfsplatz);
        verschiebe (n - 1, start, ziel);
        verschiebe (1, hilfsplatz, ziel);
    }
}
```

4.3 Stack und FIFO

Siehe Vortragsfolien und Beispielprogramme

4.4 Aufwandsabschätzungen

4.4.1 Sortieralgorithmen

Am Beispiel von Sortieralgorithmen soll hier aufgezeigt werden, wie man die Lösung eines Problems schrittweise effizienter gestalten kann.

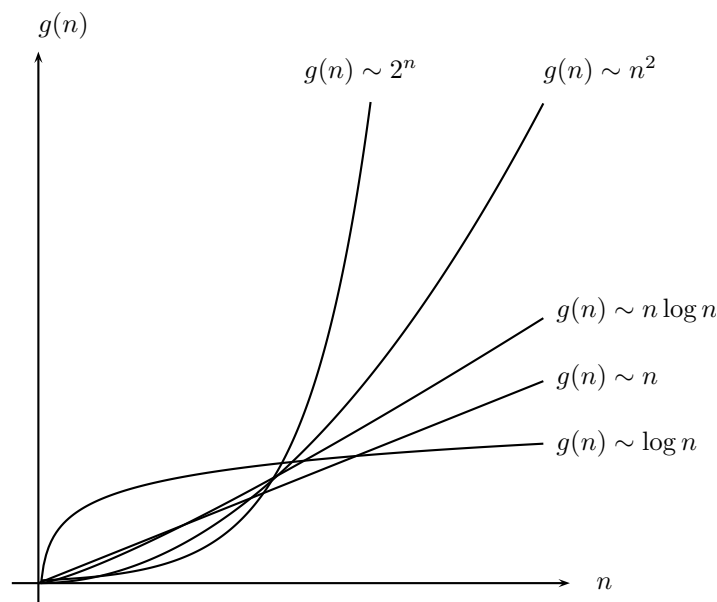
Als Problem wählen wir das Sortieren eines Arrays (z. B. von Namen).

- Minimum/Maximum ermitteln: [sort-0.c](#) bis [sort-2.c](#)
- Selectionsort: [sort-3.c](#), [sort-4.c](#)
- Bubblesort: [sort-5.c](#)
- Bubblesort mit Abbruch in äußerer Schleife: [sort-6.c](#)
- Bubblesort mit Abbruch in innerer Schleife: [sort-7.c](#), [sort-7a.c](#), [sort-7b.c](#)
- Vergleich mit Quicksort: [sort-8.c](#), [sort-8a.c](#), [sort-8b.c](#)

Bei „zufällig“ sortierten Ausgangsdaten arbeitet Quicksort schneller als Bubblesort. Wenn die Ausgangsdaten bereits nahezu sortiert sind, ist es umgekehrt. Im jeweils ungünstigsten Fall arbeiten beide Algorithmen gleich langsam.

4.4.2 Landau-Symbole

Das Landau-Symbol $\mathcal{O}(g)$ mit einer Funktion $g(n)$ steht für die *Ordnung* eines Algorithmus', also die „Geschwindigkeit“, mit der er arbeitet. Die Variable n bezeichnet die Menge der Eingabedaten, hier also z. B. die Anzahl der Namen.



- $\mathcal{O}(n)$ bedeutet, daß die Rechenzeit mit der Menge der Eingabedaten linear wächst. Um doppelt so viele Namen zu sortieren, benötigt das Programm doppelt so lange.
- $\mathcal{O}(n^2)$ bedeutet, daß die Rechenzeit mit der Menge der Eingabedaten quadratisch wächst. Um doppelt so viele Namen zu sortieren, benötigt das Programm viermal so lange.

- $\mathcal{O}(2^n)$ bedeutet, daß die Rechenzeit mit der Menge der Eingabedaten exponentiell wächst. Für jeden Namen, der dazukommt, benötigt das Programm doppelt so lange.
Ein derartiges Programm gilt normalerweise als inakzeptabel langsam.
- $\mathcal{O}(\log n)$ bedeutet, daß die Rechenzeit mit der Menge der Eingabedaten logarithmisch wächst. Für jede Verdopplung der Namen benötigt das Programm nur einen Rechenschritt mehr.
Ein derartiges Programm gilt als „traumhaft schnell“. Dies wird jedoch nur selten erreicht.
- $\mathcal{O}(1)$ bedeutet, daß die Rechenzeit von der Menge der Eingabedaten unabhängig ist: 1 000 000 Namen werden genau so schnell sortiert wie 10.
Dies ist nur in Ausnahmefällen erreichbar.
- $\mathcal{O}(n \log n)$ liegt zwischen $\mathcal{O}(n)$ und $\mathcal{O}(n^2)$.
Ein derartiges Programm gilt als schnell. Viele Sortieralgorithmen erreichen dieses Verhalten.

Wie sieht man einem Programm an, wie schnell es arbeitet?

- Vorfaktoren interessieren nicht.
Wenn ein Code immer – also unabhängig von den Eingabedaten – zweimal ausgeführt wird, beeinflußt das die Ordnung des Algorithmus nicht.
Wenn ein Code immer – also unabhängig von den Eingabedaten – 1 000 000mal ausgeführt wird, mag das Programm für kleine Datenmengen langsam erscheinen. Für die Ordnung interessiert jedoch nur das Verhalten für große Datenmengen, und dort kann dasselbe Programm durchaus schnell sein.
- Jede Schleife, die von 0 bis n geht, multipliziert die Rechenzeit des innerhalb der Schleife befindlichen Codes mit n .
Eine Doppelschleife (Schleife innerhalb einer Schleife) hat demnach $\mathcal{O}(n^2)$.
- Wenn sich die Grenzen einer Schleife ständig ändern, nimmt man den Durchschnitt.
Beispiel:

```

for (int i = 0; i < n; i++)
    for (int j = 0; j < i; j++)
        ...

```

Die äußere Schleife wird immer n -mal ausgeführt, die innere *im Durchschnitt* $\frac{n}{2}$ -mal, was proportional zu n ist.
Zusammen ergibt sich $\mathcal{O}(n^2)$.
- Bei Rekursionen muß man mitzählen, wie viele Schleifen hinzukommen.
Bei Quicksort wird z. B. in jeder Rekursion eine Schleife von 0 bis n (aufgeteilt) ausgeführt. Bei jeder Rekursion wird das Array „normalerweise“ halbiert, d. h. die Rekursionstiefe ist proportional zum Logarithmus von n (zur Basis 2). Daraus ergibt sich die Ordnung $\mathcal{O}(n \log n)$ für den „Normalfall“ des Quicksort. (Im ungünstigsten Fall kann sich auch $\mathcal{O}(n^2)$ ergeben.)

Für eine präzise Definition der Landau-Symbole siehe z. B.: <http://de.wikipedia.org/wiki/Landau-Symbole>

5 Hardwarenahe Programmierung

5.1 Bit-Operationen

5.1.1 Zahlensysteme

Dezimalsystem

- Basis: 10
- Gültige Ziffern: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

$$\begin{array}{r}
 137 \\
 \swarrow \quad \searrow \quad \nearrow \\
 \text{Einer: } 7 \cdot 10^0 \\
 \text{Zehner: } 3 \cdot 10^1 \\
 \text{Hunderter: } 1 \cdot 10^2
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 137 \\
 + 42 \\
 \hline
 179
 \end{array}$$

$$137_{10} = 1 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10^1 + 7 \cdot 10^0 = 100 + 30 + 7 = 137$$

Hexadezimalsystem

- Basis: 16
- Gültige Ziffern: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F

$$\begin{array}{r}
 137 \\
 \swarrow \quad \searrow \quad \nearrow \\
 7 \cdot 16^0 \\
 3 \cdot 16^1 \\
 1 \cdot 16^2
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 A380 \\
 + B747 \\
 \hline
 15AC7
 \end{array}$$

$$137_{16} = 1 \cdot 16^2 + 3 \cdot 16^1 + 7 \cdot 16^0 = 256 + 48 + 7 = 311$$

- Schreibweise in C: `0x137`

Oktalsystem

- Basis: 8
- Gültige Ziffern: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

$$\begin{array}{r}
 137 \\
 \swarrow \quad \searrow \quad \nearrow \\
 7 \cdot 8^0 \\
 3 \cdot 8^1 \\
 1 \cdot 8^2
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 137 \\
 + 42 \\
 \hline
 201
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 137_8 &= 1 \cdot 8^2 + 3 \cdot 8^1 + 7 \cdot 8^0 = 64 + 24 + 7 = 95 \\
 42_8 &= 4 \cdot 8^1 + 2 \cdot 8^0 = 32 + 2 = 34 \\
 201_8 &= 2 \cdot 8^2 + 0 \cdot 8^1 + 1 \cdot 8^0 = 128 + 1 = 129
 \end{aligned}$$

- Schreibweise in C: `0137`

Rechner für beliebige Zahlensysteme: GNU bc

```

$ bc
ibase=8
137      ← Eingabe zur Basis 8
95       ← Ausgabe zur Basis 10
obase=10 ← Eingabe zur Basis 8 (108 = 8)
137 + 42
201      ← Ausgabe zur Basis 8

```

Binärsystem

- Basis: 2
- Gültige Ziffern: 0, 1

$$\begin{array}{r}
 110 \\
 \swarrow \quad \searrow \quad \searrow \\
 0 \cdot 2^0 \\
 1 \cdot 2^1 \\
 1 \cdot 2^2
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{r}
 110 \\
 + 1100 \\
 \hline
 10010
 \end{array}$$

$110_2 = 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 4 + 2 + 0 = 6$

- Binär-Zahlen ermöglichen es, elektronisch zu rechnen ...
- und mehrere „Ja/Nein“ (Bits) zu einer einzigen Zahl zusammenzufassen.
- **Oktal- und Hexadezimal-Zahlen lassen sich ziffernweise in Binär-Zahlen umrechnen:**

| | | |
|-------|--------|--------|
| 000 0 | 0000 0 | 1000 8 |
| 001 1 | 0001 1 | 1001 9 |
| 010 2 | 0010 2 | 1010 A |
| 011 3 | 0011 3 | 1011 B |
| 100 4 | 0100 4 | 1100 C |
| 101 5 | 0101 5 | 1101 D |
| 110 6 | 0110 6 | 1110 E |
| 111 7 | 0111 7 | 1111 F |

Beispiel: $1101011_2 = 153_8 = 6B_{16}$

Anwendungsbeispiel: Oktal-Schreibweise für Unix-Zugriffsrechte

$-rw-r----- = 0110100000_2 = 640_8$ \$ chmod 640 file.c
 $-rwxr-x--- = 0111101000_2 = 750_8$ \$ chmod 750 subdir

IP-Adressen (IPv4)

- Basis: 256
- Gültige Ziffern: 0 bis 255, getrennt durch Punkte
- Kompakte Schreibweise für Binärzahlen mit 32 Ziffern (Bits)

$$\begin{array}{r}
 192.168.0.1 \\
 \swarrow \quad \swarrow \quad \swarrow \quad \swarrow \\
 1 \cdot 256^0 \\
 0 \cdot 256^1 \\
 168 \cdot 256^2 \\
 192 \cdot 256^3
 \end{array}$$

$192.168.0.1_{256} = 11000000101010000000000000000001_2$

5.1.2 Bit-Operationen in C

| | | | | | |
|----------|-------|--------|---------------|----------|------------------|
| 0110 | 0110 | 0110 | 0110 | 0110 | 0110 |
| + 1100 | 1100 | & 1100 | ^ 1100 | ~ 1100 | >> 2 |
| ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 10010 | 1110 | 0100 | 1010 | 0011 | 0001 |
| Addition | Oder | Und | Exklusiv-Oder | Negation | Bit-Verschiebung |

```

01101100
| 00000010
-----
01101110

```

Bit gezielt setzen

```

01101100
& 11110111
-----
01100100

```

Bit gezielt löschen

```

01101100
^ 00010000
-----
01111100

```

Bit gezielt umklappen

- Bits werden häufig von rechts und ab 0 numeriert (hier: 0 bis 7), um die Maskenerzeugung mittels Schiebeoperatoren zu erleichtern.
- Die Bit-Operatoren (z. B. & in C) wirken jeweils auf alle Bits der Zahlen. Die logischen Operatoren (z. B. && in C) prüfen die Zahl insgesamt auf $\neq 0$. Nicht verwechseln!

$6 \& 12 == 4$

$6 \&\& 12 == 1$

Anwendung: Bit 2 (also das dritte Bit von rechts) in einer 8-Bit-Zahl auf 1 setzen:

```

00000001
<<      2
-----
00000100

```

Maske für Bit 2

```

01101100
| 00000100
-----
01101100

```

Bit gezielt setzen

- Schreibweise in C: `a |= 1 << 2;`

Anwendung: Bit 2 in einer 8-Bit-Zahl auf 0 setzen:

```

00000001
<<      2
-----
00000100

```

Maske zum Löschen von Bit 2 erzeugen

```

01101100
~ 00000100
-----
11111011

```

```

01101100
& 11111011
-----
01101000

```

Bit gezielt löschen

- Schreibweise in C: `a &= ~(1 << 2);`

Anwendung: Bit 2 aus einer 8-Bit-Zahl extrahieren:

```

00000001
<<      2
-----
00000100

```

Maske für Bit 2

```

01101100
& 00000100
-----
00000100

```

Bit 2 isolieren

```

00000100
>>      2
-----
00000001

```

in Zahl 0 oder 1 umwandeln

- Schreibweise in C: `x = (a & (1 << 2)) >> 2;`

Beispiel: Netzmaske für 256 IP-Adressen

```

192.168.  1.123
& 255.255.255.  0
-----
192.168.  1.  0

```

← IP-Adresse eines Rechners

← Netzmaske: $255 = 11111111_2$

← IP-Adresse des Sub-Netzes

Beispiel: Netzmaske für 8 IP-Adressen

```

192.168.  1.123
& 255.255.255.248
-----
192.168.  1.120

```

← IP-Adresse eines Rechners

← Netzmaske

← IP-Adresse des Sub-Netzes

```

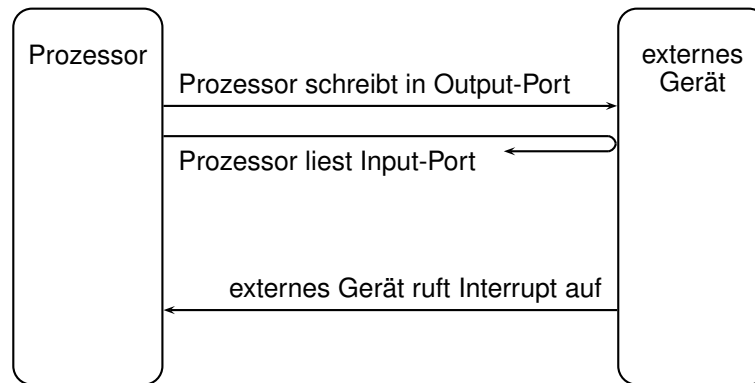
01111011
& 11111000
-----
01111000

```


5.2 I/O-Ports

Es gibt drei grundlegende Mechanismen für die Kommunikation zwischen dem Prozessor und einem externen Gerät:

- Über Output-Ports kann der Prozessor das Gerät aktiv steuern,
- über Input-Ports kann er es aktiv abfragen,
- und über Interrupts kann das externe Gerät im Prozessor Aktivitäten auslösen.



Input- und Output-Ports, zusammengefaßt: I/O-Ports, sind spezielle Speicherzellen, die mit einem externen Gerät verbunden sind.

- Ein in einen Output-Port geschriebener Wert bewirkt eine Spannungsänderung in einer Leitung, die zu einem externen Gerät führt.
- Wenn ein externes Gerät eine Spannung an eine Leitung anlegt, die zu einer Speicherzelle führt, kann der Prozessor diese als Input-Port lesen.

Um z. B. auf einen Druck auf einen Taster zu warten, kann ein Program periodisch in einer Schleife einen Input-Port lesen und die Schleife erst dann beenden, wenn der Wert für „Taster gedrückt“ gelesen wurde.

Diese Methode heißt „Busy Waiting“: Der Prozessor ist vollständig mit Warten beschäftigt. Wenn gleichzeitig noch andere Aktionen stattfinden sollen, müssen diese in der Schleife mit berücksichtigt werden.

Beispiel für die Verwendung eines Output-Ports: Roboter-Steuerung

Datei: RP6Base/RP6Base_Examples/RP6Examples_20080915/RP6Lib/RP6base/RP6RobotBaseLib.c

Suchbegriff: setMotorDir

```
void setMotorDir(uint8_t left_dir, uint8_t right_dir)
{
    mleft_dir = left_dir;
    mright_dir = right_dir;
    mleft_des_dir = left_dir;
    mright_des_dir = right_dir;
    if(left_dir)
        PORTC |= DIR_L;
    else
        PORTC &= ~DIR_L;
    if(right_dir)
        PORTC |= DIR_R;
    else
        PORTC &= ~DIR_R;
}
```

Die Variable `PORTC` ist ein Output-Port. Durch Manipulation einzelner Bits in dieser Variablen ändert sich die Spannung an den elektrischen „Beinchen“ des Mikro-Controllers. Hierdurch wird die Beschaltung von Elektromotoren umgepolt.

(Die Konstanten `DIR_L` und `DIR_R` sind „Bitmasken“, d. h. Zahlen, die in ihrer Binärdarstellung nur eine einzige 1 und ansonsten Nullen haben. Durch die Oder- und Und-Nicht-Operationen werden einzelne Bits in `PORTC` auf 1 bzw. 0 gesetzt.)

Die direkte Ansteuerung von I/O-Ports ist nur auf Mikro-Controllern üblich. Auf Personal-Computern erfolgt die gesamte Ein- und Ausgabe über Betriebssystem-„Treiber“. Anwenderprogramme greifen dort i. d. R. nicht direkt auf I/O-Ports zu.

5.3 Interrupts

Ein Interrupt ist ein Unterprogramm, das nicht durch einen Befehl (`call`), sondern durch ein externes Gerät (über ein Stromsignal) aufgerufen wird.

Damit dies funktioniert, muß die Adresse, an der sich das Unterprogramm befindet, an einer jederzeit auffindbaren Stelle im Speicher hinterlegt sein. Diese Stelle heißt „Interrupt-Vektor“.

Da ein Interrupt jederzeit erfolgen kann, hat das Hauptprogramm keine Chance, vor dem Aufruf die Registerinhalte zu sichern. Für Interrupt-Unterprogramme, sog. Interrupt-Handler, ist es daher zwingend notwendig, sämtliche Register vor Verwendung zu sichern und hinterher zurückzuholen.

Beispiel für die Verwendung eines Interrupts: Roboter-Steuerung

Datei: `RP6Base/RP6Base_Examples/RP6Examples_20080915/RP6Lib/RP6base/RP6RobotBaseLib.c`

Suchbegriff: `ISR`

```
ISR (INT0_vect)
{
    mleft_dist++;
    mleft_counter++;
    /* ... */
}
```

- Durch das Schlüsselwort `ISR` anstelle von z. B. `void` teilen wir dem Compiler mit, daß es sich um einen Interrupt-Handler handelt, so daß er entsprechenden Code zum Sichern der Registerinhalte einfügt.
- Durch die Namensgebung `INT0_vect` teilen wir dem Compiler mit, daß er den Interrupt-Vektor Nr. 0 (also den ersten) auf diesen Interrupt-Handler zeigen lassen soll.

(Tatsächlich handelt es sich bei `ISR` und `INT0_vect` um Macros.)

Die Schreibweise ist spezifisch für die Programmierung des Atmel AVR ATmega unter Verwendung der GNU Compiler Collection (GCC). Bei Verwendung anderer Werkzeuge und/oder Prozessoren kann dasselbe Programm völlig anders aussehen. Wie man Interrupt-Handler schreibt und wie man Interrupt-Vektoren setzt, ist ein wichtiger Bestandteil der Dokumentation der Entwicklungswerkzeuge.

Die so geschriebene Funktion wird immer dann aufgerufen, wenn die Hardware den Interrupt Nr. 0 auslöst. Wann das der Fall ist, hängt von der Beschaltung ab. Im Falle des RP6 geschieht es dann, wenn ein Sensor an der linken Raupenkette einen schwarzen Streifen auf der Encoder-Scheibe registriert, also immer dann, wenn sich die linke Raupenkette des Roboters um eine bestimmte Strecke gedreht hat.

Jedesmal wenn sich die Raupenkette um einen Teilstrich weitergedreht hat, werden also zwei Zähler inkrementiert. Wir können dies nutzen, um z. B. durch Auslesen des Zählers `mleft_dist` die zurückgelegte Entfernung zu messen. (Die RP6-Bibliothek selbst stellt nur eine Zeit- und eine Geschwindigkeitsmessung zur Verfügung.) Wie dies konkret geschehen kann, sei im folgenden vorgestellt.

Methode 1: Verändern des Interrupt-Handlers

- Da die Bibliothek `RP6RobotBase` im Quelltext vorhanden ist, können wir sie selbst ändern und in den Interrupt-Handler `ISR (INT0_vect)` einen eigenen Zähler für Sensor-Ticks einbauen.
- Wenn wir diesen zum Zeitpunkt A auf 0 setzen und zum Zeitpunkt B auslesen, erfahren wir, wieviele „Ticks“ der Roboter dazwischen zurückgelegt hat.

Methode 2: Verwenden eines vorhandenen Zählers

- Tatsächlich enthält `ISR (INT0_vect)` bereits zwei Zähler, die bei jedem Sensor-„Tick“ hochgezählt werden: `mleft_dist` und `mleft_counter`.
- Einer davon (`mleft_dist`) wird bei jedem `move()` auf 0 zurückgesetzt. Für diesen Zähler enthält `RP6RobotBaseLib.h` einen „undokumentierten“ Makro `getLeftDistance()`, um ihn auszulesen.
- Bei sorgfältiger Lektüre von `RP6RobotBaseLib.c` erkennt man, daß es unproblematisch ist, den Zähler vom Hauptprogramm aus auf 0 zu setzen. (Dies ist jedoch mit Vorsicht zu genießen: In einer eventuellen Nachfolgeversion der Bibliothek muß dies nicht mehr der Fall sein!)

Methode 3: Abfrage der Sensoren mittels Busy Waiting

- Alternativ zur Verwendung des Interrupt-Handlers kann man auch von der eigenen Hauptschleife aus den Sensor periodisch abfragen und bei jeder Änderung einen Zähler hochzählen.
- Diese Methode heißt „Busy Waiting“. Sie hat den Vorteil der Einfachheit aber den Nachteil, daß der Prozessor „in Vollzeit“ damit beschäftigt ist, einen Sensor abzufragen, und eventuelle andere Aufgaben nur noch „nebenher“ erledigen kann.
- Wenn aus irgendwelchen Gründen der Interrupt-Mechanismus nicht verwendet werden kann (z.B. weil der Prozessor über kein Interrupt-Konzept verfügt), könnten wir die Lichtschranke alternativ auch mit einem Input-Port verdrahten und mittels Busy Waiting abfragen.

Dies funktioniert nur dann, wenn die Schleife wirklich regelmäßig den Sensor abfragt. Sobald der Prozessor längere Zeit mit anderen Dingen beschäftigt ist, können beim Busy Waiting Signale der Lichtschranke verlorengehen. Dieses Problem besteht nicht bei Verwendung von Interrupts.

5.4 volatile-Variable

Im C-Quelltext fällt auf, daß die Zähler-Variablen `mleft_dist` und `mleft_counter` als `volatile uint16_t mleft_counter` bzw. `volatile uint16_t mleft_dist` deklariert sind anstatt einfach nur als `uint16_t mleft_counter` und `uint16_t mleft_dist`.

Das Schlüsselwort `volatile` teilt dem C-Compiler mit, daß eine Variable immer im Speicher (RAM) aufbewahrt werden muß und nicht in einem Prozessorregister zwischengespeichert werden darf.

Dies ist deswegen wichtig, weil jederzeit ein Interrupt erfolgen kann, der den Wert der Variablen im Speicher verändert. Wenn im Hauptprogramm alle „überflüssigen“ Speicherzugriffe wegoptimiert wurden, erfährt es nichts von der Änderung.

Entsprechendes gilt für I/O-Ports: Wenn ein Programm einen Wert in einen Output-Port schreiben oder aus einem Input-Port lesen soll, ist es wichtig, daß der Speicherzugriff auch tatsächlich stattfindet.

5.5 Software-Interrupts

Manche Prozessoren verfügen über einen Befehl, um Interrupts „künstlich“ auszulösen.

Das Betriebssystem MS-DOS verwendet derartige Aufrufe anstelle von „normalen“ Unterprogrammaufrufen, um Programmen Funktionen zur Verfügung zu stellen.

Beispiel: Assembler-Version von `printf ("Hello, world!\n")` unter MS-DOS bzw. Unix

MS-DOS-Version für FASM (gekürzt)

```
hello db 'Hello, world', 10, 13, '$'
mov ah, 09h
mov dx, hello
int 21h
```

Unix-Version für GCC (gekürzt)

```
hello:
    .string "Hello, world!\n"
    pushl $hello
    call printf
```

- Die MS-DOS-Version ruft den Interrupt Nr. 33 (hexadezimal: 21) auf: `int 21h`.
Die Unix-Version verwendet stattdessen einen normalen Unterprogrammaufruf: `call printf`.
- Die MS-DOS-Version übergibt Parameter in Prozessorregistern:
Die Konstante `09h` im `ah`-Register wählt die Funktion „Textausgabe“ aus;
das `dx`-Register enthält einen Zeiger auf den Text.
Die Unix-Version benutzt den Stack zur Übergabe des Parameters: `pushl $hello`.
(`$hello` ist ein Zeiger auf den Text.)
- Obwohl beide Programme auf demselben Prozessor laufen, unterscheiden sich die Sprachdialekte der beiden Assembler FASM und GCC erheblich voneinander.
(Reihenfolge der Operanden umgekehrt, Suffix `l` für „long“, Präfix `$` für Konstanten, ...)

Derartige „Software-Interrupts“ verursachen Probleme, sobald ein Gerät den Interrupt für seinen eigentlichen Zweck verwendet. MS-Windows verwendet – außer zur Emulation von MS-DOS – keine Software-Interrupts mehr.

(Ein sehr ähnlicher Mechanismus wird von modernen Betriebssystemen weiterhin für Systemaufrufe genutzt. Hier geht es darum, den Übergang von potentiell unsicherem Code in Anwenderprogrammen zum vertrauenswürdigen Code des Betriebssystems zu kontrollieren. Für Details siehe: <http://de.wikipedia.org/wiki/Software-Interrupt>, <http://de.wikipedia.org/wiki/Systemaufruf>)

5.6 Byte-Reihenfolge – Endianness

5.6.1 Konzept

Beim Speichern von Werten, die größer sind als die kleinste adressierbare Einheit (= Speicherzelle oder Speicherwort, häufig 1 Byte), werden mehrere Speicherworte belegt.

Beispiel: 16-Bit-Zahl in 2 8-Bit-Speicherzellen

$$1027 = 1024 + 2 + 1 = 0000\ 0100\ 0000\ 0011_2 = 0403_{16}$$

Diese 16-Bit-Zahl kann auf zwei verschiedene Weisen in zwei 8-Bit-Speicherzellen gespeichert werden:

| | | |
|----|----|---|
| 04 | 03 | Big-Endian, „großes Ende zuerst“, für Menschen leichter lesbar |
| 03 | 04 | Little-Endian, „kleines Ende zuerst“, bei Additionen effizienter (Schriftliches Addieren beginnt immer beim Einer.) |

Welche Konvention man verwendet, ist letztlich Geschmackssache und hängt von der verwendeten Hardware (Prozessor) und Software ab. Man spricht hier von der „Endianness“ (Byte-Reihenfolge) der Hardware bzw. der Software.

Im Kontext des Datenaustausches ist es wichtig, sich auf eine einheitliche Endianness zu verständigen. Dies gilt insbesondere für:

- Dateiformate
- Datenübertragung

5.6.2 Dateiformate

Als Beispiel für Dateiformate, in denen die Reihenfolge der Bytes in 16- und 32-Bit-Zahlen spezifiziert ist, seien hier Audio-Formate genannt:

- RIFF-WAVE-Dateien (.wav): Little-Endian
- Au-Dateien (.au): Big-Endian
- ältere AIFF-Dateien (.aiff): Big-Endian
- neuere AIFF-Dateien (.aiff): Little-Endian

Insbesondere ist es bei AIFF-Dateien wichtig, zu prüfen, um welche Variante es sich handelt, anstatt sich auf eine bestimmte Byte-Reihenfolge zu verlassen.

Bei Dateiformaten mit variabler Endianness ist es sinnvoll und üblich, die Endianness durch eine Kennung anzuzeigen. Dies geschieht häufig am Anfang der Datei (im „Vorspann“ – „Header“).

Als weiteres Beispiel seien zwei Monochrom-Grafik-Formate genannt. Hier steht jedes Bit für einen schwarzen bzw. weißen Bildpunkt, daher spielt die Reihenfolge der Bits in den Bytes eine entscheidende Rolle. (Diese Grafik-Formate sind Ihnen bereits aus der Vorlesung „Angewandte Informatik“ bekannt.)

- PBM-Dateien: Big-Endian, MSB first – die höchstwertige Binärziffer ist im Bild links
- XBM-Dateien: Little-Endian, LSB first – die höchstwertige Binärziffer ist im Bild rechts

MSB/LSB = most/least significant bit

Achtung: Die Abkürzungen „MSB/LSB“ werden manchmal auch für „most/least significant *byte*“ verwendet. Im konkreten Fall ist es ratsam, die verwendete Byte- und Bit-Reihenfolge genau zu recherchieren bzw. präzise zu dokumentieren.

5.6.3 Datenübertragung

Bei der Übertragung von Daten über Leitungen spielt sowohl die Reihenfolge der Bits in den Bytes („MSB first“ bzw. „LSB first“) als auch die Reihenfolge der Bytes in den übertragenen Zahlen („Big-/Little-Endian“) eine Rolle.

Als Beispiele seien genannt:

- RS-232 (serielle Schnittstelle): MSB first
- I²C: LSB first
- USB: beides

Um Übertragungsfehler erkennen zu können, werden im USB-Protokoll bestimmte Werte einmal gemäß der MSB-first- und einmal gemäß der LSB-first-Konvention übertragen und anschließend auf Gleichheit geprüft.

- Ethernet: LSB first
- TCP/IP (Internet): Big-Endian

Insbesondere gilt für die Übertragung z. B. einer 32-Bit-Zahl über das Internet, daß die vier Bytes von links nach rechts (Big-Endian) übertragen werden, die acht Bits innerhalb jedes Bytes hingegen von rechts nach links (LSB first).

5.7 Speicherausrichtung – Alignment

Ein 32-Bit-Prozessor kann auf eine 32-Bit-Variable effizienter zugreifen, wenn die Speicheradresse der Variablen ein Vielfaches von 32 Bits, also 4 Bytes ist. Eine Variable, auf die dies zutrifft, heißt „korrekt im Speicher ausgerichtet“ („aligned“).

„Effizienter“ kann bedeuten, daß Maschinenbefehle zum Arbeiten mit den Variablen schneller abgearbeitet werden. Es kann aber auch bedeuten, daß der Prozessor gar keine direkte Bearbeitung von inkorrekt ausgerichteten Variablen erlaubt. In diesem Fall bedeutet eine inkorrekte Speicherausrichtung, daß für jede Operation mit der Variablen anstelle eines einzelnen Maschinenbefehls ein kleines Programm aufgerufen werden muß.

Um zu verstehen, welche Konsequenzen dies für die Arbeit mit Rechnern hat, betrachten wir die folgenden Variablen (in C-Schreibweise):

```
uint8_t a;  
uint16_t b;  
uint8_t c;
```

Die Anordnung dieser Variablen im Speicher könnte z. B. folgendermaßen aussehen:

| | |
|------|-----|
| | ... |
| 3005 | |
| 3004 | |
| 3003 | c |
| 3002 | b |
| 3001 | |
| 3000 | a |
| 2fff | |
| | ... |

Ein optimierender Compiler wird für eine korrekte Ausrichtung der Variablen `b` sorgen, beispielsweise durch Auffüllen mit unbenutzten Speicherzellen:

| | |
|------|-----|
| | ... |
| 3005 | |
| 3004 | c |
| 3003 | |
| 3002 | b |
| 3001 | |
| 3000 | a |
| 2fff | |
| | ... |

Alternativ ist es dem Compiler auch möglich, die korrekte Ausrichtung durch „Umsortieren“ der Variablen herzustellen und dadurch „Löcher“ zu vermeiden:

| | |
|------|-----|
| | ... |
| 3005 | |
| 3004 | |
| 3003 | b |
| 3002 | |
| 3001 | c |
| 3000 | a |
| 2fff | |
| | ... |

Fazit: Man kann sich als Programmierer nicht immer darauf verlassen, daß die Variablen im Speicher in einer spezifischen Weise angeordnet sind.

In vielen existierenden Programmen geschieht dies dennoch. Diese Programme sind fehlerhaft. Dort kann es z. B. passieren, daß nach einem Upgrade des Compilers schwer lokalisierbare Fehler auftreten.

Entsprechende Überlegungen gelten für 64-Bit- und 16-Bit-Prozessoren. Die Größe der Variablen, aufgerundet auf die nächste Zweierpotenz, gibt eine Ausrichtung vor. Die Registerbreite des Prozessors markiert die größte Ausrichtung, die noch berücksichtigt werden muß.

Bei 8-Bit-Prozessoren stellt sich die Frage nach der Speicherausrichtung normalerweise nicht, weil die kleinste adressierbare Einheit eines Speichers selten kleiner als 8 Bits ist.

Beispiele:

- Eine 64-Bit-Variable auf einem 64-Bit-Prozessor muß auf 64 Bits ausgerichtet sein.
- Eine 32-Bit-Variable auf einem 64-Bit-Prozessor braucht nur auf 32 Bits ausgerichtet zu sein.
- Eine 64-Bit-Variable auf einem 32-Bit-Prozessor braucht nur auf 32 Bits ausgerichtet zu sein.
- Eine 64-Bit-Variable auf einem 8-Bit-Prozessor braucht nur auf 8 Bits ausgerichtet zu sein.

Bei der Definition von Datenformaten tut man gut daran, die Ausrichtung der Daten von vorneherein zu berücksichtigen, um auf möglichst vielen – auch zukünftigen – Prozessoren eine möglichst effiziente Bearbeitung zu ermöglichen.

Wenn ich beispielsweise ein Dateiformat definiere, in dem 128-Bit-Werte vorkommen, ist es sinnvoll, diese innerhalb der Datei auf 128 Bits (16 Bytes) auszurichten, auch wenn mein eigener Rechner nur über einen 64-Bit-Prozessor verfügt.

6 Ergänzungen und Ausblicke

6.1 String-Operationen

Die Include-Datei `string.h` deklariert eine Sammlung nützlicher Funktionen für den Umgang mit Strings (`char *`).

In den Sortierprogrammen `sort-*.c` wurde davon bereits die Funktion `strcmp()` verwendet.

`strcmp(foo, bar)` liefert den Wert `-1` zurück, wenn der String `foo` alphabetisch kleiner ist als der String `bar`, sie liefert `0` zurück, wenn beide Strings gleich sind, und sie liefert `1` zurück, wenn `foo` alphabetisch größer ist als `bar`.

6.2 Dateien

- `fhello.c` ist das klassische „Hello, world!,-Programm in einer Variante, die in eine Datei `hello.txt` anstelle der Standardausgabe schreibt.

Auch die Standardausgabe ist übrigens eine „normale“ Datei. `printf(foo)` ist nur eine Abkürzung für `fprintf(stdout, foo)`.

- `fread-1.c` zeigt, wie man zeilenweise aus einer Textdatei liest.

Dieses Programm prüft nicht, ob die Datei tatsächlich erfolgreich geöffnet werden konnte. Dies hat zur Folge, daß im Fehlerfall versucht wird, auf einen `NULL`-Pointer zuzugreifen – also einen Absturz.

Das Programm ist somit grob fehlerhaft.

- `fread-2.c` zeigt, wie es besser geht: Wenn die Datei nicht geöffnet werden kann, wird eine Fehlermeldung ausgegeben und das Programm kontrolliert beendet.

Es besteht aber weiterhin ein Problem: Die Fehlerursache „Datei nicht gefunden“ wurde lediglich geraten. Sie kann falsch sein und somit, anstatt hilfreich zu sein, den Benutzer in die Irre führen.

Auch dieses Programm ist also noch grob fehlerhaft.

- `fread-3.c` zeigt die korrekte Vorgehensweise: Mit Hilfe der Systemvariablen `errno` (deklariert in `errno.h`) und der Funktion `strerror()` (deklariert in `string.h`) wird geprüft, welcher Fehler vorliegt. Anhand dieser Information wird dann die vom Betriebssystem für diesen Fall vorgesehene Fehlermeldung ausgegeben.

Dieselben Überlegungen zur Fehlerbehandlung gelten natürlich auch für das Öffnen einer Datei zum Schreiben, hier also auch für `fhello.c`.

6.3 Objektorientierte Programmierung

In Abschnitt 2.12 haben wir Funktionen geschrieben, die eine **struct**-Variable bearbeiten.

Das Konzept, Funktionen möglichst eng mit den Daten zu bündeln, die sie bearbeiten, ist ein wichtiger Aspekt der *objektorientierten Programmierung*.

Das Beispielprogramm [dates-1.c](#) illustriert einen Satz von Funktionen zur Bearbeitung von **date**-Objekten, sog. *Methoden*. Methoden erwarten als „standardisierten“ ersten Parameter das Objekt: einen Zeiger **this** auf ein C-**struct**. Wenn der Satz von Funktionen vollständig ist, ist es nicht mehr nötig, direkt auf die Datenfelder des **structs** zuzugreifen. Dies nennt man *Kapselung*.

Viele Sprachen (z. B. C++ als Weiterentwicklung von C) unterstützen objektorientierte Programmierung durch Sprachelemente. In diesen Sprachen ist der **this**-Parameter i. d. R. nicht sichtbar, sondern implizit.

Das Beispielprogramm [dates-2.c](#) geht noch einen Schritt weiter und verankert im Objekt Zeiger auf Methoden – sog. *virtuelle Methoden*. Dieses mit den Callback-Funktionen vergleichbare Konzept ermöglicht es, verschiedenen, miteinander „verwandten“ Objekten Methoden mit gleichen Namen zuzuordnen, die sich aber unterschiedlich verhalten. Dies nennt man *Polymorphie*.

Wenn die o. a. „Verwandschaft“ von Objekten darin besteht, daß das eine Objekt ein anderes erweitert (zusätzliche Datenfelder und Methoden, evtl. veränderte, *überschriebene* virtuelle Methoden), spricht man von *Vererbung*. Das Objekt, das erweitert wird, ist der *Vorfahre* des anderen Objekts.

In Sprachen wie C, die keine Sprachelemente für objektorientierte Programmierung zur Verfügung stellen, kann dennoch Objektorientierung „zu Fuß“ erreicht werden. Die GUI-Bibliothek GTK+, die ursprünglich für das Bildverarbeitungsprogramm GIMP entwickelt wurde, inzwischen aber in zahlreichen Programmen (z. B. Mozilla Firefox) ihren Dienst tut, funktioniert auf diese Weise.