Wintersemester 2021/2022

Programmierung 3 (PR3) - C-Programmierung

Vorlesung - Hochschule Mannheim

C Grundlagen

Prof. Thomas Smits

Stand: 15. Mai 2023

hochschule mannheim

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Grundlagen

1.1 Warum zum Teufel C? [5]

C ist – nach heutigen Maßstäben – eine uralte Programmiersprache, die für den Benutzer unkomfortabel ist und ihn wenig davor beschützt Fehler zu machen. Viele Dinge, die man in Java ein einigen Zeilen erledigen kann, benötigen in C umfangreiche Konstrukte und bereiten viel Aufwand, bis sie einwandfrei funktionieren. C ist ein Dinosaurier unter den Programmiersprachen.

Warum sollte man sich heute noch mit C beschäftigen? Oder noch kürzer „warum zum Teufel C?“.

- C ist gleichzeitig High- und Lowlevel-Sprache
- Bessere Kontrolle über die Maschine / das Betriebssystem
- Etwas bessere Performance als Java
- Für Echtzeitprogrammierung geeignet
- Geeignet für die Programmierung von Betriebssystemen
- Aber
  - Explizite Speicherverwaltung
  - Keine eingebaute Fehlerbehandlung
  - Verzeiht keine Fehler
  - Code ist umfangreicher als Java
- Viel alter Code ist in C geschrieben
  - Linux, BSD
  - Windows
  - Java VMs
  - Embedded Systems
- C hilft die Hardware zu verstehen

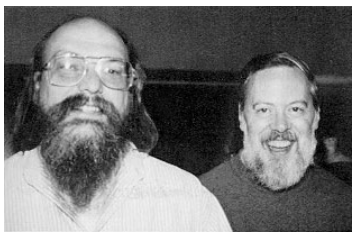
C ist auf keinen Fall irrelevant und wird heute noch in vielen Bereichen eingesetzt. Durch die Nähe zur Maschine und die explizite Speicherverwaltung kann man in C Dinge programmieren, die in anderen Sprachen nicht zu bewältigen wären, z. B. Betriebssysteme oder Echtzeitanwendungen. Eine Echtzeitanwendung, z. B. die Steuerung eines Airbags, wäre in Java undenkbar, da Java gelegentlich Pausen für die Garbage Collection einlegt und damit kein vorhersehbares Zeitverhalten hat. Ebenso benötigt man für die Entwicklung eines Betriebssystems eine Sprache, die direkten Zugriff auf die Hardware erlaubt – eine Java VM wäre hier auf jeden Fall im Weg.

Wenn man sich mit fortgeschrittenen Themen wie Reverse Engineering beschäftigt, also der Frage, wie man ein vorliegendes Programm im Maschinencode analysieren kann, ist C ein wichtiges Hilfsmittel. Wegen seiner Nähe zur Hardware kann man Maschinenprogramm einfach als C-Code darstellen, sodass man beim Reverse Engineering nicht die Assembler-Instruktionen lesen muss, sondern sich mit dem daraus erzeugten C-Code beschäftigen kann.

1.2 Geschichte von C [7]

1960er Jahre

- Viele neue Sprachen
  - *COBOL* für Geschäftsanwendungen
  - *FORTRAN* für wissenschaftliche Berechnungen
  - *PL/I* als Sprache der 2. Generation
  - *Lisp*, *Simula* für Informatik-Forschung (AI)
  - *Assembler* für Betriebssysteme und zeitkritischen Code
- Betriebssysteme
  - OS/360
  - MIT/GE/Bell Labs Multics (PL/I)
- Bell Labs wollte eigenes Betriebssystem schreiben (Ersatz für *Multics*)
- Multics war in PL/I geschrieben
- Ken Thompson entwickelte B auf Basis von BCPL auf der PDP-7 (16kByte RAM) → einfacher als PL/I und BCPL
- Dennis Ritchie entwickelt auf Basis von B die Sprache C (1969–1973)



Die Geschichte von C beginnt zu einer Zeit, als die Entwicklung der Computer noch in den Kinderschuhen steckte.

Nachdem zu Beginn alle Programme direkt in der Maschinensprache des jeweiligen Prozessors geschrieben wurde, entstanden in den 1960 Jahren neue Hochsprachen, welche die Programmierung und die Übertragung von Programmen auf neue Hardware vereinfachen sollten. Die neu entwickelten Sprachen konzentrierten sich jeweils auf spezifische Bereiche: COBOL für Geschäftsanwendungen, FORTRAN für mathematische Berechnungen und Lisp für die KI-Forschung – Lisp ist tatsächlich eine der ältesten Programmiersprachen überhaupt, mit einer ersten Spezifikation aus dem Jahr 1958.

Eine der wenigen Sprachen der damaligen Zeit, die für einen breiteren Anwendungsbereich vorgesehen wurde, war PL/I, die 1964 das Licht der Welt erblickte.

Hello World in PL/I

```
Hello2: proc options(main);
     put list ('Hello, world!');
end Hello2;
```

Ebenso rudimentär wie bei den Programmiersprachen war die Lage bei den Betriebssystemen: Diese wurden ebenfalls in Assembler geschrieben und liefen ausschließlich auf der Hardware, für die sie Entwickelt wurden.

Aus dem Bedürfnis heraus, einen Nachfolger für Multics zu entwickeln, begannen Ken Thompson und Dennis Ritchie um 1965 mit der Entwicklung von Unix. Ein Ziel der beiden war, das Betriebssystem möglichst einfach auf neue Hardware portieren zu können, wobei kleinere Minicomputer wie die PDP/7 oder PDP/11 unterstützt werden sollten. Die verfügbaren Programmiersprachen waren dafür aber entweder zu hardwarenah (Assembler) oder zu schwergewichtig (PL/I), weswegen Thompson mit B) eine neue Sprache entwarf.

Beispielprogramm in B

```
main()
{
    auto c;
    auto d;
    d=0;
    while(1)
    {
        c=getchar();
        d=d+c;
        putchar(c);
    }
}
```

Ritchie entwickelte B dann weiter zur Sprache C, wie wir sie heute kennen. Er und Thompson verwendeten C, um das Betriebssystem Unix zu entwickeln. Die ersten Versionen von Unix waren noch in Assembler geschrieben, ab 1973 (Version 4 Unix) dann in C.

1.3 Von C zu Java [9]

- C: Dennis Ritchie (1969–1973)
  - Sprache zur Systemprogrammierung
  - Macht das Betriebssystem hardwareunabhängig
  - Nicht für Anwendungen gedacht (→ PL/I oder Fortran)
- C++: Bjarne Stroustrup (Bell Labs), 1980er
  → objektorientierte Erweiterung zu C
- Java: James Gosling in den 1990ern
  - Für eingebettete Systeme gedacht
  - Objektorientiert (ähnlich C++)
  - Syntax von C übernommen

Nachdem C in den 1970er Jahren entwickelt wurde, wurde es in den 1980er Jahren von Bjarne Stroustrup um Objektorientierung erweitert, woraus dann C++ entstand.

```
#include <iostream>

int main(int argc, const char * argv[])
{
    std::cout << "Hello, world!\n";
}
```

Parallel zu C++ wurde von Tom Love und Brad Cox mit Objective-C eine andere objektorientierte Version von C entworfen, die sich bei Apple lange Zeit als Programmiersprache für macOS-Anwendungen gehalten hat, inzwischen aber von Swift abgelöst wird.

Hello World in Objective-C

```
// FILE: hello.m
#import <Foundation/Foundation.h>
int main (int argc, const char * argv[])
{
    /* my first program in Objective-C */
    NSLog(@"Hello, World! \n");
    return 0;
}
```

Die die Syntax der Sprache C diente als Vorbild für viele weitere Sprachen, die heute noch in Gebrauch sind. Neben Java und C# finden sich viele Ideen von C ebenfalls in Go, PHP und weiteren Sprachen wieder.

1.4 C vs. Java [10]

Da Java bei uns als erste Programmiersprache dient, ist es sinnvoll einen Vergleich zwischen Java und C zu ziehen.

- Java ist eine *objektorientierte* Sprache von Mitte der 1990er Jahre
- C ist eine frühe *prozedurale* Sprache aus den frühen 1970er Jahren
- *Vorteile* von C
  - Direkter Zugriff auf das Betriebssystem (System-Calls)
  - Wenig Probleme mit Bibliotheken – läuft einfach
- *Nachteile* von C
  - Sprache ist portabel, Schnittstellen zum Betriebssystem nicht
  - Memory-Leaks drohen
  - Präprozessor ist obskur (und die Fehler noch mehr)

Java ist mehr als 20 Jahre jünger als C und mit einem anderen Ziel entwickelt worden: Während C maschinen- und hardwarenah für die Betriebssystementwicklung entworfen wurde, hatte Java das Ziel möglichst maschinenunabhängig zu sein und sollte für die Entwicklung von Anwendungen – damals für Set-Top-Boxen – dienen. Außerdem ist Java konsequent objektorientiert, während C rein prozedural ist.

Die Entwickler von Java habe sich dafür entschieden, die *Syntax* von Java an C anzulehnen, um Vertrautes zu verwenden. Die *Semantik* von Java orientiert sich aber viel mehr an Smalltalk als an C. Java-Code sieht auf den ersten Blick C-Code ähnlich, funktioniert aber häufig anders.

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Unterschiede zwischen den beiden Sprachen.

Java	**C**
objektorientiert	prozedural
strikt getypt	getypt, kann aber übersteuert werden
polymorphismus	-
Klassen und Pakete für Namespaces	Flacher Namensraum
keine Makros	Makros Kern der Sprache
automatische Speicherverwaltung	manuelle Speicherverwaltung
keine Pointer	Pointer
by-value	by-value
Ausnahmebehandlung	Manuelle Fehlerbehandlung
Threads Teil der Sprache	Threads über Bibliotheken
Arrays kennen ihre Länge	Arrays kennen ihre Länge nicht
String als Datentyp	Ausschließlich `char[]`
Viele Bibliotheken	Bibliotheken vom Betriebssystem

Aus der Tabelle sind vier Aspekte besonders herauszuheben, die Umsteigern von Java auf C häufig Schwierigkeiten bereiten:

- *Speicherverwaltung*: In C muss der Entwickler die gesamte Speicherverwaltung übernehmen. Sowohl das Reservieren, als auch das Freigeben von Speicher muss explizit erfolgen.
- *Pointer*: Pointer sind in C ein wichtiger Datentyp und können über die sogenannte Pointerarithmetik manipuliert werden. Ein sicherer Umgang mit Pointern ist unerlässlich, um C-Programme schreiben zu können.
- *Strings*: C kennt keine Strings. Zeichenketten werden als Arrays von Zeichen (`char[]`) realisiert, deren Ende durch ein Nullbyte (`0x00`) gekennzeichnet ist.
- *Länge von Arrays*: Ein C-Array kennt seine Länge nicht und es ist Aufgabe des Entwicklers, die Länge zu verwalten und an Funktionen, die Arrays verwalten zu übergeben.

Java-Programm

- Sammlung von Klassen
- `main`-Methode einer Klasse wird aufgerufen
- Java VM lädt Klassen bei Bedarf aus JAR-Archiven nach

C-Programm

- Sammlung von Funktionen
- Eine Funktion (`main`) ist der Einstiegspunkt
- Alle Funktionen sind zu einem Executable zusammengefasst
- Dynamische Libraries (`.dll`, `.so`) enthalten gemeinsam genutzte Funktionen

Da C nicht objektorientiert ist, bestehen C-Programme nicht aus Klassen, sondern sind eine Sammlung von Funktionen, die sich gegenseitig aufrufen. Alle Funktionen eines C-Programms werden vom Linker (siehe unten) in ein sogenanntes *Executable* zusammengefasst. Gemeinsam genutzte Funktionen werden in dynamischen Libraries abgelegt, die unter Windows die Dateiendung `.dll` und unter Linux/Unix die Dateiendung `.so` bekommen.

1.5 Das erste C-Programm [13]

Im Folgenden soll ein erstes C-Programm Schritt für Schritt analysiert werden. Hierzu dient das berühmte „Hello World“-Beispiel.

HelloWorld.java

```
public class Hello {
    public static void main(String[] args) {
      System.out.println("Hello, World!");
    }
}
```

hello_world.c

```c
#include <stdio.h>

int main(int argc, char** argv) {
    /* Greet the World */
    printf("%s", "Hello, World!\n");
    return 0;
}
```

- `#include <stdio.h>`
  - Zeilen mit # werden vom Präprozessor ausgewertet
  - lädt ein Header-File (→ `import` in Java)
- `int main(int argc, char** argv) {`
  - deklariert eine Funktion
  - Rückgabetyp `int`
  - zwei Parametern `argc` und `argv`
    `argc` ist die Anzahl der Argumente
    `argv` ist ein Array von Zeichen mit den Argumenten

Die *Präprozessordirektiven* werden mit # eingeleitet und sind eine Besonderheit von C-Programmen. Auf den *Präprozessor* wird später noch detailliert eingegangen. Hier sei allerdings bereits erwähnt, dass ein C-Programm in zwei Schritten kompiliert wird: Zuerst verarbeitet der Präprozessor den Quelltext und erzeugt Dateien, die dann vom C-Compiler verarbeitet werden. Dies bedeutet, dass der C-Compiler die Präprozessordirektiven gar nicht versteht, sondern dafür ein eigenes Werkzeug zuständig ist. Dieses Vorgehen kann man nur historisch aus den Beschränkungen der damaligen Hardware nachvollziehen.

Die zwei Sterne bei `char **argv` bedeuten, dass es sich um einen Pointer auf einen Pointer handelt, der auf ein Zeichen zeigt. Das ergibt auf den ersten Blick wenig Sinn, denn an der entsprechenden Stelle wird in Java ein Array von Strings übergeben. In C findet sich hier ebenfalls ein Array von Strings, die aber, da es keine Strings gibt, Arrays von Zeichen sind. Wir haben es somit mit einem Array von Arrays von Zeichen zu tun. In Java könnte man sich das dann als `char[][]` vorstellen. Der letzte Stein zum Verständnis der ** ist, dass ein Array in C als Pointer auf das erste Element verstanden werden kann, z. B. sind `int a[]` und `int* a` identisch. Der Zugriff kann entweder über den Index erfolgen `a[3]` oder aber über den Pointer `*(a+3)`. Damit ist das Geheimnis von `**argv` für das Erste gelüftet. Details zu Arrays und Pointern werden später noch diskutiert.

Es bleibt noch die Frage, warum C eine Variable `int argc` hat, Java aber nicht? Der Grund ist, dass in C die Länge eines Arrays nicht bekannt ist und deshalb der `main`-Funktion mitgegeben werden muss, wie viele Parameter `argv` enthält. Für die Länge der Strings brauchen wir keine Längenangaben, weil diese *Nullterminiert* sind, also am Ende ein `0x00`-Byte haben.

- `/* Greet the World */`

- Kommentar
- Achtung: `//` ist kein Kommentarzeichen in ANSI-C (erst seit C99 und in C++)

- `printf("%s", "Hello, World!\n");`
  - gibt einen String aus (→ `printf` in Java)
  - `%s` ist der Platzhalter, der durch `Hello, World!\n` ersetzt wird
  - `\n` fügt einen Zeilenvorschub ein
- `return 0;`
  - beendet das Programm und gibt `0` als *Exit-Code* an das Betriebssystem zurück (→ `System.exit(0)` in Java)

Da fast alle C-Compiler C++-Compiler sind, akzeptieren sie `//` als Kommentarzeichen. Trotzdem ist `//` kein gültiger C-Kommentar. Da es immer passieren kann, dass ein C-Programm von einem Compiler übersetzt wird, der kein C++ beherrscht, sollte man auf `//` als Zeilenkommentar verzichten, insbesondere wenn man ältere Compiler antreffen könnte. In C99-Standard wurde `//` als Kommentarzeichen für Zeilenkommentare endlich auch in C aufgenommen.

Die Verwendung von Format-Strings ist bei C und Java nahezu identisch, was kein Wunder ist, da es Java einfach von C übernommen hat.

Am Ende übergibt jedes Programm einen Integer-Wert an das Betriebssystem um Fehler anzeigen zu können. Per Konvention bedeutet `0`, das kein Fehler im Programm aufgetreten ist.

Kapitel 2

Compiler

2.1 Compilieren und Linken bei Java [17]

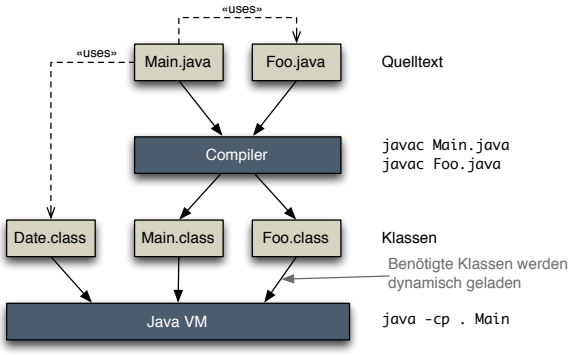
- Java kennt keine Header-Dateien, jede Java-Klasse ist selbstbeschreibend
  - Verwender kann alle Meta-Informationen aus der .class-Datei beziehen
  - `javap` dient dazu, diese Informationen auszugeben
- Java kennt keinen Linker, sondern nur einen Compiler
- Klassen
  - werden von der Java VM dynamisch bei Bedarf geladen
  - werden erst geladen, wenn sie das erste Mal benötigt werden
  - werden erst bei Bedarf von der VM intern gelinkt
- Java VM sucht die Klassen auf dem *Klassenpfad (classpath)* (VM-Option `-cp` oder `-classpath`)

Das Übersetzen von Programmen mit Java folgt anderen Prinzipien als das Übersetzen und Linken in klassischen Programmiersprachen.

In Java existieren keine Header-Dateien, sondern der Verwender eine Klasse kann alle Informationen, die er benötigt, aus der Klasse selbst beziehen. Java-Klassen sind somit selbstbeschreibend und enthalten sowohl die Definition als auch die Deklaration von Methoden und Variablen. Man kann sich diese Meta-Informationen mit dem Tool `javap` ansehen.

Bei Java existiert kein Linker, d. h. die kompilierten Klassen werden nicht in einem zusätzlichen Schritt zu einer ausführbaren Datei gebunden. An Stelle des Linkers fungiert die Java-VM, die während des Ablauf eines Programms dynamisch alle Klassen nachlädt, die von diesem benötigt werden *(dynamic classloading)*. Natürlich müssen auch im Falle von Java die Beziehungen zwischen den Klassen aufgelöst werden und symbolische Methodenaufrufe durch echte ersetzt werden. Dieses Binden oder Linken wird aber von der VM intern zur Laufzeit durchgeführt und ist daher für den Verwender nicht sichtbar.

Damit die Java-VM die benötigten Klassen finden kann, kann man mithilfe der Kommandozeilenoption `-classpath` festlegen, wo sie überall nach Klassen suchen soll.



2.2 Klassische Programmiersprachen [19]

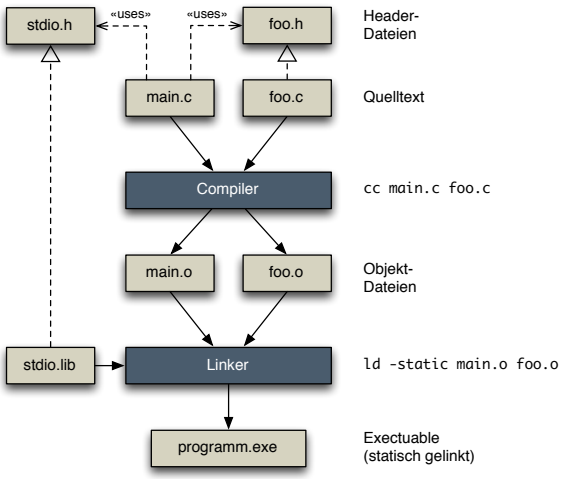
In klassischen Programmiersprachen (C, C++, …) besteht die Programmerzeugung aus zwei Schritten

- *Übersetzen (compile)* – die Quelldateien werden einzeln in plattformspezifischen Maschinencode übersetzt
- *Binden (link)* – alle Teile des Programms werden zu einer einzigen ausführbaren Datei (*Executable*) zusammengebunden
  - *statisches Binden* – das erzeugte Executable enthält alle Programmteile und alle Bibliotheken
  - *dynamisches Binden* – nur Teile des Programms sind im Executable enthalten, andere Teile (meistens Bibliotheken) werden bei Bedarf zur Laufzeit nachgeladen

Klassische Programmiersprachen (C, C++, Modula 2, Pascal) erzeugen ausführbare Dateien, die spezifisch für die jeweilige Plattform sind, d. h. sie enthalten Maschinenbefehle für den Prozessor der Maschine. Um die Programmierung modularisieren zu können, wird die Erzeugung einer solchen Binärdatei in zwei Schritte aufgeteilt:

- Im ersten Schritt werden die vorhandenen Quelldateien vom Compiler in Maschinencode für die Plattform übersetzt. Hierbei werden allerdings die Beziehungen zwischen den Quelldateien noch nicht aufgelöst, da sie einzeln übersetzt werden. Beziehungen (meist Funktionsaufrufe), die sich von einer auf die andere Quelldatei beziehen werden nur vermerkt aber noch nicht miteinander verbunden. Das Ergebnis eines solchen Schrittes bezeichnet man als *Objektdatei (object file)*.
- In einem zweiten Schritt, sammelt ein weiteres Werkzeug, der *Linker*, alle benötigten Objektdateien zusammen und löst die Querbeziehungen auf, indem er die symbolischen Referenzen durch echte Funktionsaufrufe ersetzt (binden). Als Ergebnis erhält man eine *Programmdatei (executable)*.

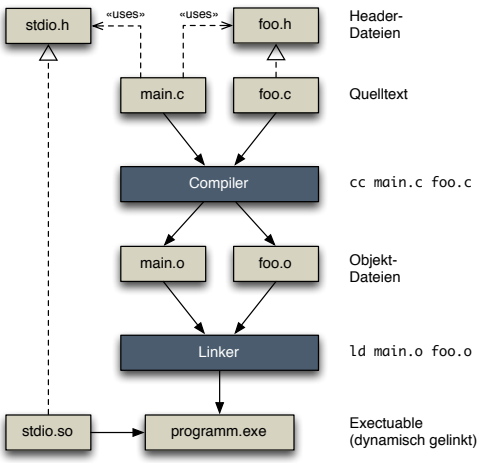
Beim Linken besteht die Möglichkeit entweder alle Objektdateien statisch zu einem einzigen Executable zu binden (statisches Linken) oder aber erst zu Laufzeit einzelne Teile nachzuladen (dynamisches Linken).



Beim *statischen Linken* werden alle notwendigen Objektdateien zu einem großen Executable zusammengebunden. Wenn das Programm Funktionen aus Bibliotheken (z. B. der C-Standardbibliothek) verwendet, werden diese ebenfalls in das Executable kopiert.

Der Vorteil eines statisch gelinkten Programms ist, dass es keine Abhängigkeiten zum System hat, auf dem es ausgeführt wird. Es bringt alle seine Bibliotheken und Funktionen mit. Der Nachteil ist, dass das Programm deutlich größer ist und das Betriebssystem keine Möglichkeit hat, die Standardbibliotheken ressourcenschonend nur einmal zu Laden. Somit sind sowohl die Binärdatei als auch der Speicherverbrauch deutlich größer.

Für C-Programme verwendet man normalerweise kein statisches Linken. In Go ist es aber der Normalfall, weil Go das Ziel hat, das gesamte Programm in einer einzigen Datei auszuliefern.



Im Gegensatz zum statischen Linken, werden beim *dynamischen Linken* nur die Objektdateien des Programms selbst zusammengefügt, alle externen Bibliotheken aber nicht. Der Linker setzt an die Stellen, an denen externe Bibliotheken gerufen werden, spezielle Verweise, die erst beim Laden des Programms von einem weiteren Programm, dem *Dynamischen Linker (dynamic linker)*, aufgelöst werden.

2.3 Beispielprogramm kompilieren [22]

- Quelltext zu einer Objektdatei `hello_world.o` (nicht ausführbar) kompilieren

```
$ gcc -Wall -c hello_world.c
```

- Objektdatei (`hello_world.o`) zu einem Executable (`hello_world`) binden

```
$ gcc -o hello_world hello_world.o
```

- Programm ausführen

```
$ ./hello_world
Hello, World!
$
```

Man kann die Datei auch direkt in einem Schritt zu einem Executable compilieren, und zwar mit dem Aufruf: `gcc -o hello_world hello_world.c`. Hierbei ist die Angabe des Zieldateinamens mit `-o` wichtig, da andernfalls eine Datei mit dem Namen `a.out` für das fertige Programm erstellt wird. Der

Name `a.out` hat historische Gründe und steht als Abkürzung für *assembler output*. Ursprünglich bezeichnete es ein Dateiformat in frühen Unix-Systemen, ist inzwischen aber nur noch ein Relikt aus alten Zeiten, da unter Unix die ausführbaren Dateien im ELF-Format vorliegen.

Die Option `-Wall` bittet den C-Compiler darum, möglichst viele Warnungen (`-W`) auszugeben, damit Programmierfehler schneller erkannt werden. Wie wir noch sehen werden, kann man sich in C schnell selbst ein Bein stellen und `-Wall` sorgt dafür, dass der Compiler, zumindest in vielen Fällen, eine Warnung hiervor ausgibt.

Mit `-c` weist man den Compiler an, die Datei in eine Objektdatei nur zu compilieren und noch nicht zu linken. Obwohl der Linker ein getrenntes Programm ist (`ld` beim gcc) ist der Compiler normalerweise so nett, ihn für uns aufzurufen. Mit `-c` unterbinden wir das.

Wenn man dem Compiler anstatt einer Quelldatei eine Objektdatei (Endung `.o`) vorlegt, dann ruft er den Linker auf und linkt die Datei für uns. Den Namen der Zieldatei geben wir mit `-o` an.

Wir können die Datei auch linken, ohne den Compiler zu verwenden, indem wir den Linker selbst aufrufen, dafür müssen wir dem Linker aber eine ganze Reihe von Informationen mitgeben, die der Compiler sowieso schon hat, z. B. wo sich die Bibliotheken auf dem Computer befinden.

Linkeraufruf von Hand

```
$ ld -v -plugin /usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/10/liblto_plugin.so \
  -plugin-opt=/usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/10/lto-wrapper \
  -plugin-opt=-fresolution=/tmp/ccVVbwld.res \
  -plugin-opt=-pass-through=-lgcc \
  -plugin-opt=-pass-through=-lgcc_s \
  -plugin-opt=-pass-through=-lc \
  -plugin-opt=-pass-through=-lgcc \
  -plugin-opt=-pass-through=-lgcc_s \
  --build-id --eh-frame-hdr -m elf_x86_64 --hash-style=gnu --as-needed \
  -dynamic-linker /lib64/ld-linux-x86-64.so.2 -pie -z now -z relro \
  -o hello_world \
  /usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/10/../../../x86_64-linux-gnu/Scrt1.o \
  /usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/10/../../../x86_64-linux-gnu/crti.o \
  /usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/10/crtbeginS.o \
  -L/usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/10 \
  -L/usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/10/../../../x86_64-linux-gnu \
  -L/usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/10/../../../../lib \
  -L/lib/x86_64-linux-gnu \
  -L/lib/../lib -L/usr/lib/x86_64-linux-gnu \
  -L/usr/lib/../lib \
  -L/usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/10/../../.. hello_world.o -lgcc \
  --push-state \
  --as-needed -lgcc_s --pop-state -lc -lgcc --push-state \
  --as-needed -lgcc_s \
  --pop-state /usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/10/crtendS.o \
  /usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/10/../../../x86_64-linux-gnu/crtn.o
```

Deswegen lassen wir den Compiler den Linker aufrufen und überlasen ihm die ganze Komplexität.

2.4 Beispiel: Mehrere Dateien [23]

Ein C-Programm besteht normalerweise aus mehreren Dateien, die man einzeln compilieren kann und die dann vom Linker zu einem ausführbaren Programm gebunden werden. Im folgenden Beispiel haben wir die Begrüßung in eine eigene Datei `greeter.c` ausgelagert, die eine passende Funktion `greeter` anbietet.

greeter.c

```c
#include <stdio.h>
#include "greeter.h"

void greeter(char* name) {
    printf("Hello, %s!\n", name);
}
```

greeter.h

```c
#ifndef GREETER_H
#define GREETER_H
void greeter(char* name);
#endif
```

main.c

```c
#include "greeter.h"

int main(int argc, char** argv) {
    greeter("Thomas");
}
```

Kompilieren und linken

```
$ cc -c main.c
$ cc -c greeter.c
$ cc -o hello_world main.o greeter.o
$ ./hello_world
Hello, Thomas!
$
```

Wenn man den Code ansieht, tauchen sofort vier Fragen auf:

1. Warum gibt es neben `greeter.c` auch noch ein `greeter.h`?
2. Warum inkludiert `main.c` die Datei `greeter.h`?
3. Wieso inkludiert `greeter.c` die Datei `greeter.h`, die doch nur noch einmal die Funktionsdeklaration enthält?

4. Was soll das `#ifndef`-Zeugs?

Zur Beantwortung dieser Fragen muss man verstehen, wie der C-Compiler die Objektdateien erzeugt und was der Linker genau macht.

Jede Quelldatei wird getrennt kompiliert

Jede Quelldatei wird getrennt kompiliert, ohne Betrachtung irgend einer anderen Quelldatei. Verbindungen über Quelldateien hinweg kann erst der Linker erzeugen. Wenn der Compiler die Datei `main.c` compiliert, dann trifft er dort auf den Funktionsaufruf `greeter("Thomas");`. Diese Funktion ist in der Datei aber nicht bekannt, d. h. es käme zu einem Fehler, denn Funktionen, die es nicht gibt, können wir nicht aufrufen.

Wie sagen wir dem Compiler also, dass er chillen soll und die Funktion schon später vom Linker herangeschafft werden wird? Wir sagen es ihm, indem wir eine *Deklaration* der Funktion angeben, also den Kopf der Funktion ohne Rumpf zur Verfügung stellen. Dem Compiler reicht dies, denn er muss nicht wissen, was die Funktion macht, nur dass es sie später geben wird. Den Rest überlässt er dann entspannt dem Linker. Wir könnten also `main.c` einfach so aussehen lassen:

```
/* Deklaration von Greeter */
void greeter(char* name);

int main(int argc, char** argv) {
    greeter("Thomas"); /* Verwendung von greeter */
}
```

Das wäre aber nicht besonders schlau, weil die Deklaration von `greeter` nicht zu `main.c` gehört, sondern zu `greeter.c`, weswegen wir sie in eine eigene *Header-Datei* (Dateiendung `.h`) auslagern und diese dann von `main.c` aus inkludieren.

Header-Dateien beschreiben die Schnittstelle

Jetzt kann man sich vorstellen, dass viele verschiedene Programme die tolle Funktionalität von `greeter.c` mit der `greeter`-Funktion nutzen wollen. Deswegen ist es in C üblich, dass jede `.c`-Datei, die Funktionen für andere zur Verfügung stellt, diese über eine korrespondierende *Header-Datei* (`.h`) beschreibt. Möchte ich die Funktionen nutzen, inkludiere ich die Header-Datei, nutze die Funktionen und der Linker macht den Rest.

Nichts anderes macht `greeter.c` in der ersten Zeile mit `#include <stdio.h>`: Hier wird ebenfalls eine Header-Datei inkludiert, nämlich eine der C-Standardbibliothek, welche die `printf`-Funktion zur Verfügung stellt. In Zeile 332 der Datei `stdio.h` findet sich dann `extern int printf (...);` also die Deklaration der `printf`-Funktion. Das `extern` können Sie ignorieren da es bei einer Funktions-Deklaration[^nicht aber einer Variablen-Deklaration] redundant ist, man kann also sowohl `extern int f();` als auch `int f();` schreiben. Der fehlende Funktionsrumpf impliziert das `extern`.

Warum inkludieren wir `stdio.h` mit spitzen Klammern, `greeter.h` aber mit Anführungszeichen? Die Antwort ist, dass Header-Dateien, die vom System und seinen Bibliotheken zur Verfügung gestellt werden, mit <> inkludiert und vom Compiler automatisch an festgelegten Stellen gesucht werden. Header-Dateien, die vom User geschrieben wurde, werden mit `""` inkludiert und werden im aktuellen Verzeichnis gesucht. Man kann beim Inkludieren mit `""` auch relative Pfade verwenden, z. B. `#include "../welcome/greeter.h"`.

Deklaration und Definition müssen übereinstimmen

Die Datei `greeter.c` enthält die *Definition* der Funktion `greeter`. Beachten Sie bitte den Unterschied:

- *Deklaration*: Beschreibung der Schnittstelle der Funktion (Rückgabetyp, Name, Parameter)
- *Definition*: Implementierung der Funktion = Deklaration + Funktionsrumpf

Eine Funktion darf *beliebig oft* deklariert aber *nur einmal* definiert werde. Diese spitzfindige Behandlung der beiden Begriffe kennen Sie aus Java nicht, weil dort – bedingt durch das Design der Sprache – Definition und Deklaration fast immer gleichzeitig passieren: Die Ausnahme sind abstrakte Methoden.

Warum inkludiert `greeter.c` jetzt die Header-Datei mit der Deklaration einer Funktion, die sofort danach definiert wird? Die Antwort ist: So wird verhindert, dass die Funktionen sich aus Versehen unterscheiden, denn Definition und Deklaration einer Funktion *gleichen Namens* müssen immer übereinstimmten. Wenn ich also aus Versehen einen anderen Rückgabetyp oder andere Parameter in `greeter.c` als in `greeter.h` benutzen würde, fiele das nicht auf, wenn ich nicht `greeter.h` in `greeter.c` inkludieren. Der Linker interessiert sich nämlich nicht für die Parameter und Rückgabetypen und linkt die Funktionen ausschließlich anhand der Namen.

Das folgende Beispiel zeigt das Problem:

greeter.c

```c
#include <stdio.h>
/* Hier fehlt das #include von greeter.h */

void greeter(char* name, int age) {
    printf("Hello, %s! You are %d years old!\n", name, age);
}
```

greeter.h

```c
void greeter(char* name);
```

main.c

```c
#include "greeter.h"

int main(int argc, char** argv) {
```

```
    greeter("Thomas");
}
```

Wenn man das folgende Programm compiliert – was problemlos klappt – und ausführt, dann bekommt man einen sehr seltsamen Output:

```
$ cc -Wall -c greeter.c
$ cc -Wall -c main.c
$ cc -o hello_world greeter.o main.o
$ ./hello_world
Hello, Thomas! You are 2006438408 years old!
```

Woher diese unglaubliche Zahl kommt, können Sie einmal selbst überlegen.

Durch das Inkludieren der eigenen Header-Datei verhindert man, dass es zu einer Abweichung von Deklaration und Definition kommt:

greeter.c

```c
#include <stdio.h>
#include "greeter.h"

void greeter(char* name, int age) {
    printf("Hello, %s! You are %d years old!\n", name, age);
}
```

```
cc -Wall -c greeter.c
greeter.c:4:6: error: conflicting types for 'greeter'
    4 | void greeter(char* name, int age) {
      |      ^~~~~~~
In file included from greeter.c:2:
greeter.h:3:6: note: previous declaration of 'greeter' was here
    3 | void greeter(char* name);
      |      ^~~~~~~
```

Doppelte Includes vermeiden

Solange eine Header-Datei nur Deklarationen enthält ist es kein Problem, wenn sie mehrfach eingebunden wird. Meist passiert eine solche mehrfache Einbindung indirekt: A inkludiert B und H, B inkludiert H. Probleme entstehen aber, wenn Header-Dateien Dinge enthalten, die nur einmal vorkommen dürfen (z. B. `#define`). Um hier Konflikte zu verhindern, verwendet man die folgende Konstruktion, um sicherzustellen, dass jede Header-Datei nur einmal vorkommt:

```
#ifndef __NAME_DER_DATEI__
#define __NAME_DER_DATEI__
...
#endif
```

Der Bereich zwischen `#ifndef` (If Not Defined) und `#endif` wird nur dann ausgeführt, wenn die Variable `__NAME_DER_DATEI__` nicht gesetzt ist. Danach wird die Variable sofort gesetzt, sodass beim nächsten Auftreten desselben Konstruktes, der Bereich zwischen `#ifndef` und `#endif` ignoriert wird.

2.5 Makefile [25]

Das Ausführen der Kommandos zum Kompilieren und Linken kann komplex werden. Deshalb fasst man sie in einem *Makefile* zusammen

```
# Makefile für das Hello-World-Programm
# Achtung: Einrückung muss mit Tabs erfolgen
.PHONY: all clean
all: hello_world

clean:
    rm -f main.o greeter.o hello_world

main.o: main.c greeter.h
    cc -Wall -c main.c

greeter.o: greeter.c greeter.h
    cc -Wall -c greeter.c

hello_world: main.o greeter.o
    cc -o hello_world main.o greeter.o
```

C-Programme von Hand zu kompilieren ist eine Qual. Zwar könnte man dem Compiler immer wieder einfach alle C-Dateien vorwerfen (`cc -o hello_world main.c greeter.c`), dies würde aber unnötig Zeit verschlingen. Der Compiler würde alle Dateien immer wieder neu kompilieren, auch wenn sich nichts geändert hat.

Dieses Problem wird vom Werkzeug `make` adressiert, das fast so alt wie C ist und konzeptionell hervorragend dazu passt. Eine Make-Datei besteht aus:

- *Targets*: Dateien, die erzeugt werden sollen
- *Prerequisites*: Dateien, von denen das Target abhängt
- *Recipes*: Kommandos die ausgeführt werden, um die Targets zu erzeugen

Betrachtet man die folgenden Zeilen:

```
main.o: main.c greeter.h
    cc -Wall -c main.c
```

Dann ist

- `main.o` das Target
- `main.c` und `greeter.h` die Prerequisites
- `cc -Wall -c main.c` das Recipe

Man gibt beim Aufruf von `make` ein Target an (tut man das nicht, wird das erste Target in der Datei – normalerweise `all` genannt – angesprungen). Jetzt schaut `make`, ob alle Prerequisites existieren. Ist dem nicht so, sucht es nach einem Target, das das Prerequisites erzeugt. Ist ein Prerequisite vorhanden, wird geprüft, ob es neuer als das Target ist. (Falls das Target nicht existiert, wird es einfach als älter als alle Prerequisites betrachtet.) Ist das Target älter als mindestens eines der Prerequisites, wird das Recipe ausgeführt, um das Target auf den neuesten Stand zu bringen.

Durch diesen Mechanismus sorgt `make` dafür, dass immer nur dann die Recipes ausgeführt werden, wenn sich eine Änderung an den Dateien ergeben hat, die für ein Target notwendig sind. Bei großen Projekten führt das zu einer erheblichen Beschleunigung des Entwicklungsprozesses, weil nicht immer alles compiliert werden muss.

Das erste Target (hier `all`) im Makefile wird automatisch angesprungen. Wenn es sich bei einem Target nicht um eine Datei, sondern ein generisches Target wie `all` oder `clean` handelt, wird es als `.PHONY` gekennzeichnet. Dies verhindert, dass das Target nicht mehr angesprungen wird, wenn es eine gleichnamige Datei gibt.

Man kann in Makefiles auch Variablen verwenden, um sich einige Tipparbeit zu sparen. Im folgenden ein einfaches Beispiel dazu.

```
CC = cc
COMPILER_OPTIONS = -Wall

.PHONY: all clean
all: hello_world

clean:
	@rm -f *.o hello_world

main.o: main.c greeter.h
	$(CC) $(COMPILER_OPTIONS) -c $<

greeter.o: greeter.c greeter.h
	$(CC) $(COMPILER_OPTIONS) -c $<

hello_world: greeter.o main.o
```

```
	$(CC) -o $@ $^
```

Die Variablen `$(CC)` und `$(COMPILER_OPTIONS)` sollten selbsterklärend sein. Verwirrender sind die anderen Variablen, die mit `$` beginnen:

- `$<`: Wird durch das erste Prerequisite ersetzt. Im vorliegenden Beispiel sind das die C-Dateien.
- `$^`: Wird durch *alle* Prerequisites ersetzt, im Beispiel die Objektdateien.
- `$@`: Wird durch das Target ersetzt.

Diese Variablen werden als *automatischen Variablen* bezeichnet, weil man sie nicht selbst setzen muss, sondern Sie von `make` automatisch mit Werten belegt werden. Ihre Verwendung hilft dabei, Wiederholungen in den Make-Files zu vermeiden.

Es gibt natürlich noch deutlich mehr Möglichkeiten, Makefiles zu verbessern und zu vereinfachen. Bei großen Projekten arbeitet man meist mit einem Haupt-Makefile und entsprechenden Unter-Makefiles für Subprojekte.

Wenn man den GNU C-Compiler verwendet, kann man sich die Dependencies zwischen den einzelnen C-Dateien automatisch vom Compiler erzeugen lassen. Dazu dient die Option `-MM`. Ein solches Makefile für das aktuelle Projekt sähe dann wie folgt aus:

```
CC = cc
COMPILER_OPTIONS = -Wall
SOURCES := $(wildcard *.c)
OBJECTS := $(patsubst %.c,%.o,$(SOURCES))

.PHONY: all clean
all: hello_world .depend

clean:
	@rm -f *.o hello_world .depend

.depend: $(SOURCES)
	$(CC) $(COMPILER_OPTIONS) -MM $^ > "$@"

include .depend

%.o: %.c
	$(CC) $(COMPILER_OPTIONS) -c $<

hello_world: $(OBJECTS)
	$(CC) $(COMPILER_OPTIONS) -o $@ $^
```

Wenn man das Makefile erstellt hat, kann man sehen, dass nach Änderungen nur die notwendigen Dateien neu kompiliert werden.

```
$ make
cc -Wall -c greeter.c
cc -Wall -c main.c
cc -o hello_world greeter.o main.o

$ touch greeter.c
$ make
cc -Wall -c greeter.c
cc -o hello_world greeter.o main.o

$ touch main.c
$ make
cc -Wall -c main.c
cc -o hello_world greeter.o main.o
```

Kapitel 3

Präprozessor

3.1 C-Präprozessor [29]

Als C entwickelt wurde, waren Hauptspeicher und Festplattenplatz knapp, was zu einem spartanischen Sprachumfang von C geführt hat. Beispielsweise war C nicht in der Lage, Dateien beim Kompilieren zu inkludieren, sodass schnell der Wunsch aufkam die Sprache dahingehend zu erweitern, damit Konstrukte wie wir sie heute von den Header-Dateien kennen überhaupt möglich wurden. Aus heute nicht mehr nachvollziehbaren Gründen wurden diese neuen Aufgaben aber an ein getrenntes Programm ausgelagert, den *Präprozessor*.

Der *Präprozessor* (*preprocessor*) cpp löst Makros im Quelltext auf, bevor der Code an den Compiler geht

```
#include <stdio.h>
#define PI 3.141592653589793
#define area(r) ((r) * (r) * PI)

int main() {
    printf("%f", area(10));
}
```

```
$ cpp < main.c
...
int main() {
    printf("%f", ((10) * (10) * 3.141592653589793));
}
```

Der C-Präprozessor verarbeitet den Quelltext und die Makros *bevor* der Compiler mit der Arbeit beginnt. Korrekterweise muss man allerdings anmerken, dass der Präprozessor heute Bestandteil des Compilers geworden ist, um die Geschwindigkeit zu erhöhen. Er bleibt aber technisch vom

eigentlichen Compiler getrennt und hat seine eigene Syntax. Über das Kommando cpp kann man den Präprozessor direkt aufrufen.

Der Präprozessor weiß auch nicht, welche Sprache er verarbeitet, wie das folgende Beispiel zeigt:

Datei: non_c.txt

```
#define BEWERTUNG super
#define NOTE 1

Die Vorlesung PR3 ist BEWERTUNG. Ich gebe ihr eine NOTE.
```

Ausgabe des Präprozessors

```
$ cpp non_c.txt
Die Vorlesung PR3 ist super. Ich gebe ihr eine 1 .
```

3.2 Syntax des Präprozessors [30]

Losgelöst von der Sprache C entwickelt, hat der Präprozessor seine eigene Syntax, die sich durch die #-Zeichen am Anfang jeder Direktive zeigt.

- Der Präprozessor wird mit *Direktiven* gesteuert, die immer mit # am Zeilenanfang beginnen
- Direktiven stehen meistens am Anfang der Datei
- Aufgaben
  - Dateien mit `#include` laden
  - Konstanten mit `#define` definieren
  - Macros mit `#define` definieren
  - Bedingte Compilierung mit `#ifdef`, `#ifndef` und `#endif`
- Compiler-Option `-E` zeigt die Ausgaben des Präprozessors an
- Präprozessor muss nicht mit dem Compiler benutzt werden

Wie wir später sehen werden, sollte man in modernem C-Code versuchen, den Präprozessor weitesgehend zu vermeiden. Die Direktive, die man allerdings nicht umgehen kann, ist die `#include`-Direktive, die auch 51 Jahre nach der Erfindung von C die einzige Möglichkeit bleibt Dateien zu inkludieren.

- `#include <DATEINAME>`: Inkludiert einen Standardheader
  z. B. `#include <stdio.h>`
  - Normalerweise ausgehend von `/user/include`
  - Suchpfad kann mit der Compileroption `-I` geändert werden

- `#include "DATEINAME"`: Inkludiert einen Header
  z. B. `#include "gretter.h"`
  - relativ zum aktuellen Verzeichnis

Als Daumenregel gilt:

- Von Ihnen geschriebene Header-Dateien → `#include "DATEINAME"`
- Header-Dateien von Bibliotheken, die Sie benutzen → `#include <DATEINAME>`

Der C-Präprozessor erlaubt es *Makroersetzungen* durchzuführen. Hierbei werden mit `#define` definierte Ausdrücke im Text gesucht und ersetzt. Die Makros können einfache Konstanten aber auch Ausdrücke mit Variablen sein.

- `#define NAME [KONSTANTE]`: Definiert eine neue Konstante
  z. B. `#define PI 3.141592653589793`
  - Name wird *textuell* mit Wert im Programm ersetzt
  - Wird benutzt um globale Konstanten zu definieren
  - Wert ist optional (im Zusammenhang mit `#ifdef`)
  - Name ist im Debugger nicht zu sehen!
- `#define NAME(p1, p2) AUSDRUCK`: Definiert ein *Macro*
  z. B. `#define area(r) ((r) * (r) * PI)`
  - Kann für typunabhängigen Code verwendet werden
  - Ergibt *inline Funktionen* (heute unnötig)
- `#undef NAME`: Entfernt eine Konstantendefinition

Beachten Sie als erstes, dass es kein Gleichheitszeichen oder ähnliches zwischen dem Namen und dem Wert des Macros gibt. Name und Wert werden einfach durch ein Leerzeichen getrennt.

Im Anschluss an den Namen kann man Parameter (in Klammern) angeben, die im Macro verwendet werden. Der Präprozessor setzt dann die Parameter in das Macro ein, wenn er es im Text ersetzt. Wichtig ist allerdings zu verstehen, dass der Präprozessor hier keinerlei Intelligenz walten lässt und einfach stupide Ersetzungen durchführt. Angenommen, dass Macro sei `#define square ((x)*(x))` und Sie schreiben `printf("%d", square("Hallo"));` dann macht der Präprozessor daraus `printf("%d", (("Hallo")*("Hallo")));`.

Wenn man eine Macro verwendet, um globale Konstanten zu definieren, z. B. `#define MAX_VALUE 42`, dann erfolgt die Ersetzung vor dem Compilieren. D. h. in dem generierten Objekt-File sind alle Informationen zu dem Macro-Namen (`MAX_VALUE`) entfernt und dort steht nur noch der eigentliche Wert von 42. Dies kann das Debuggen von C-Programmen erschwerten.

Die – auf den ersten Blick unnötigen – Klammern im Macro `#define area(r) ((r) * (r) * PI)` sind wichtig, damit es bei der Expansion des Makros nicht zu fehlerhaftem C-Code kommt.

Das folgende Beispiel zeig das Problem. Der Code

```
#define PI 3.141592653589793
#define area(r) (r * r * PI)

int main() {
  double r = area(3.0 + 1.0)
}
```

wird expandiert zu

```
int main() {
  double r = (3.0 + 1.0 * 3.0 + 1.0 * 3.141592653589793);
}
```

was auf jeden Fall falsch ist.

Für Macros gibt es zwei Argumente:

- Sie sind schneller als Funktionen: Da das Macro vor dem Compilieren ersetzt wird, finde an der Stelle kein Funktionsaufruf statt, sondern der Ausdruck wird direkt eingesetzt. Das Macro verhält sich somit wie eine Inline-Funktion. Moderne Compiler führen aber ohnehin bei der Optimierung des Codes ein *Inlining* von kurzen Funktionen durch, sodass dieses Argument heute nur begrenzt gültig ist.
- Man kann damit typunabhängigen Code erzeugen: Der Präprozessor weiß nichts von C-Datentypen, sodass man dasselbe Macro unabhängig vom Typ der Variablen einsetzen kann. Der C-Compiler würde dies nicht akzeptieren, da er eine strenge Typprüfung durchführt und für jeden Parameter einer Funktion ein Typ angegeben werden muss. Als Entwickler muss man sich aber darüber im Klaren sein, dass die Typsicherheit von C ein Feature ist, das man nicht leichtfertig unterlaufen sollte.

3.3 Beispiel: Typunabhängiger Code [33]

```
#include <stdio.h>
#define min(x, y) ((x) < (y) ? x : y)
#define max(x, y) ((x) > (y) ? x : y)

int main() {
    printf("%d\n", max(4, 5));
    printf("%f\n", max(4.3, 5.7));
    printf("%ld\n", min(4L, 7L));
}
```

Dieses Beispiel zeigt, wie man ein Macro verwenden kann, um `max` und `min` so zu definieren, dass es für alle numerischen Datentypen verwendet werden kann. Allerdings kann man sich fragen, ob dies wirklich nötig ist: Die Entwicklerin kennt beim Aufruf der `min`- oder `max`-Funktion den Datentyp und könnte auch problemlos eine passende C-Funktion aufrufen.

```c
#include <stdio.h>

int int_min(int x, int y) { return (x < y ? x : y); }
long long_min(long x, long y) { return (x < y ? x : y); }
double double_min(double x, double y) { return (x < y ? x : y); }

int main() {
    printf("%d\n", int_min(4, 5));
    printf("%f\n", double_min(4.3, 5.7));
    printf("%ld\n", long_min(4L, 7L));
}
```

Der Aufwand ist nur geringfügig höher und Macros werden vollständig vermieden.

Ein Grund Macros zu vermeiden liegt darin, dass *Macros keine Funktionen sind.*

3.4 Macros sind keine Funktionen [34]

Einer der gängigen Fehler bei der Verwendung von Macros ist, sie sich als C-Funktionen vorzustellen. Wegen der identischen Syntax bei der Verwendung (`area(20)`) kann dies leicht passieren. Sie sind aber keine Funktionen, sondern rein textuelle Ersetzungen.

- Macros sind keine Funktionen, sondern textuelle Ersetzungen!

```c
#include <stdio.h>
#define valid(x) ((x) > 0 && (x) < 20)

int main() {
    int x = 0;
    if (valid(x++)) { /* tu was */ }
    printf("%d\n", x);

    x = 1;
    if (valid(x++)) { /* tu was */ }
    printf("%d\n", x);
}
```

Ausgabe

```
1
3
```

Die Ausgabe versteht man, wenn man das Macro textuell ersetzt. Dann sieht der Code wie folgt aus:

```
int main() {
    int x = 0;
    if (((x++) > 0 && (x++) < 20)) { }
    printf("%d\n", x);

    x = 1;
    if (((x++) > 0 && (x++) < 20)) { }
    printf("%d\n", x);
}
```

Wenn x > 0 ist, werden beide Bedingungen geprüft und die Variable wird zweimal inkrementiert. Dies liegt daran, dass das Macro kein Funktionsaufruf ist, bei dem die Parameter auf den Stack geschrieben werden, sondern eine textuelle Ersetzung, bei der `x++` einfach in das Macro eingesetzt wird.

3.5 Bedingte Compilierung [35]

Mithilfe des C-Präprozessor kann man eine *Bedingte Compilierung* durchführen, d. h. abhängig von dem Wert eines Ausdrucks werden einzelne Teile des Codes ausgeblendet oder eben nicht.

Syntax

```
#if AUSDRUCK
  /* code 1 */
#elif AUSDRUCK2
  /* code 2 */
#else
  /* code 3 */
#endif
```

- Präprozessor prüft `AUSDRUCK`
- Wenn der Ausdruck wahr ist, wird der erste Code-Bereich ausgegeben
- Wenn er falsch ist, werden die nächsten `#elif`-Ausdrücke geprüft
- Wenn kein Ausdruck wahr ist, wird der `#else`-Bereich ausgegeben
- Wird häufig benutzt, um plattformspezifischen Code zu schreiben

Welche Arten von Ausdrücken sind in einem `#if` erlaubt? Es sind alle C-Ausdrücke erlaubt, die sich als arithmetischer Ausdruck auffassen lassen, also zu `0` oder einem anderen Zahlen-Wert ausgewertet werden:

- Zeichenvergleiche (keine Anführungszeichen!)
  `#if OS == linux`
- Numerische Vergleiche
  `#if VERSION == 5`
  `#if VERSION > 5`
  `#if VERSION + 2 > 5`
- Logische Operationen
  `#if VERSION == 5 && OS == linux`
  `#if !(VERSION == 5)`
- Prüfung auf Existenz eines Macros mit `defined` (besser `#ifdef` und `#ifndef`)
  `#if defined OS`

Die Macros werden vor dem Vergleich einfach wieder textuell ersetzt, d. h. aus

```
#define OS linux
#define VERSION 5
#if OS == linux && VERSION == 5
```

wird

```
#if linux == linux && 5 == 5
```

Da die Macros vom C-Präprozessor und nicht vom C-Compiler ausgewertet werden, können keine Ausdrücke verwendet werden, die sich auf dem C-Typsystem abstützen, z. B. ist kein `sizeof()`-Operator verfügbar.

Wenn ein Macro nicht gesetzt ist, also undefiniert, dann wird in numerischen Vergleichen einfach angenommen, dass es den Wert `0` hat. Somit kann man `#if defined BUFSIZE && BUFSIZE >= 1024` vereinfachen zu `#if BUFSIZE >= 1024`.

Will man Code einfach von der Compilierung ausnehmen aber keinen Kommentar verwenden (z. B. weil Kommentare nicht geschachtelt werden können), kann man einfach `#if 0` verwenden:

```
#if 0
/* wird nicht ausgewertet */
#endif
```

Das folgende Beispiel zeigt, wie man die bedingte Compilierung verwendet, um Code für verschiedene Betriebssysteme zu schreiben.

```
#define OS linux

#if OS == linux
    /* Linux Code */
#else
    /* Was anderes als Linux */
#endif /* OS == linux */
```

Das Macro `OS` würde in der Praxis nicht im Quelltext definiert, sondern von außen über den Compiler mit einem entsprechenden Schalter gesetzt. Der C-Compiler setzt bereits eine Reihe von Macros, um plattformabhängigen Code einfach zu ermöglichen, z. B. gibt es ein Macro `__cplusplus`, das anzeigt, ob ein C++ oder „nur“ ein C-Compiler im Einsatz sind.

Da man bei Präprozessor-Makros keine Schachtelung durch Einrückung darstellen kann, hat es sich eingebürgert, beim `#endif` zu notieren, zu welchem `#if` es gehört.

Will man nur auf die Existenz eines Macros prüfen, dann bietet sich mit `#ifdef` und `#ifndef` ein einfacher Mechanismus an.

Syntax

```
#ifdef NAME
    /* code 1 */
#else
    /* code 2 */
#endif
```

- Präprozessor prüft, ob `NAME` mit `#define NAME` definiert wurde und gibt abhängig den ersten oder zweiten Codeblock aus
- Für den umgekehrten Fall gibt es noch `#ifndef`

Der Code aus dem Beispiel ist identisch mit:

```
#if defined NAME
    /* code 1 */
#else
    /* code 2 */
#endif
```

3.6 Schutz vor doppelter Inklusion [38]

- Doppelte Definitionen sind in C verboten
- Header-Dateien werden oft mehrfach (direkt und indirekt) inkludiert → Fehler
- Lösung: Header-File mit Präprozessor vor doppelter Inklusion schützen

myheader.h

```
/* Konvention: DATEINAME */
#ifndef MYHEADER_H
#define MYHEADER_H
/* Deklarationen */
#endif /* MYHEADER_H */
```

Die Gründe für dieses Vorgehen wurden schon weiter oben detailliert besprochen, sodass hier auf die Details verzichtet wird.

3.7 Vordefinierte Variablen [39]

Der C-Standard erfordert, dass bestimmte Macros vom Compiler automatisch gesetzt werden und vom C-Quelltext verwendet werden können. Einige der wichtigsten sind:

- `__FILE__`: Name der aktuellen Quelltextdatei
- `__LINE__`: laufende Zeile der aktuellen Quelltextdatei
- `__DATE__`: aktuelles Datum
- `__TIME__`: aktuelle Uhrzeit
- `__cplusplus`: gesetzt, wenn der Compiler C++ unterstützt
- …

Verwendung beispielsweise für Testausgaben von Variablen:

```
printf("file %s, line %d, Wert: %ld\n", __FILE__, __LINE__, wert);
```

3.8 There will be Dragons [40]

Der Präprozessor ist ein Werkzeug, mit dem man viel machen aber auch viel falsch machen kann.

- Der Präprozessor stammt aus der Computer-Steinzeit
- Der Präprozessor ist ein steter *Quell von Problemen*
- Man sollte Präprozessor-Direktiven nur sehr *sparsam einsetzen*
- Es gibt für fast alle Anwendungszwecke Alternativen direkt in C

- `#define INT16 ...` → `typedef`
- `#define MAXLEN 256` → `const`
- `#define max(a,b) ...` → Funktionen
- Auskommentieren von Code → Versionsverwaltung

Eine per Macro durchgeführte Typdefinition kann man einfach durch ein `typedef` ersetzen:

```
#define INT16 short

void f(INT16 param) {
    /* tu was */
}
```

kann man auch schreiben als:

```
typedef short int16;

void f(int16 param) {
    /* tu was */
}
```

Konstanten lassen sich durch C-Konstanten ersetzen:

```
#include <unistd.h>
#define MAXLEN 256

int main() {
  char buffer[MAXLEN];

  read(0, buffer, MAXLEN);
}
```

wird zu

```
#include <unistd.h>
const int MAXLEN = 256;

int main() {
  char buffer[MAXLEN];

  read(0, buffer, MAXLEN);
}
```

Kapitel 4

Kontrollstrukturen

4.1 Block [42]

- Wie in Java, werden Anweisungen, die zwischen zwei geschweiften Klammern { } stehen als *Block* bezeichnet. Ein Block kann überall dort eingesetzt werden, wo auch ein einzelnes Statement stehen kann (z. B. in Kontrollstrukturen)

```
int i = 7;

{
  /* Dies ist ein Block */
  i++;
}
```

4.2 Auswahl (if) [43]

if-Anweisung bietet eine einseitige Auswahl

- Syntax: `if (BEDINGUNG) { TRUE-ZWEIG }`
- wenn die logische Bedingung erfüllt ist wird der True-Zweig ausgeführt

```
if (antwort == 42) {
    printf("Die Antwort auf alle Fragen");
}
```

Bedingung ist vom Typ `int`

Da sich Java bei der Syntax und den Kontrollstrukturen stark von C hat beeinflussen lassen, sollte es nicht verwunden, dass die C-Kontrollstrukturen denen von Java exakt gleichen. (Nur ist es natürlich in Wirklichkeit genau anders herum.)

Ein ganz großer Unterschied zu Java ist der *Typ der Bedingung*: Während in Java die Bedingung vom Datentyp `boolean` sein muss, ist sie in C vom Datentyp `int`. Der Grund ist, dass es in C keinen Datentyp für Wahrheitswerte gibt, sondern diese einfach als `int` dargestellt werden. Hierbei gilt, dass

- `0` → false
- `!= 0` → true

Dieses Manko wurde im Standard adressiert und ein neuer Datentyp `_Bool` wurde in C99 eingeführt. Er heißt `_Bool`, weil man sich nicht getraut hat, den Datentyp `bool` zu nennen: Existierende Programme, die sich selbst einen `bool` definiert haben, hätten sonst nicht mehr compiliert.

Der C11-Standard hat über die Header-Datei `stdbool.h` einen „echten“ `bool` eingeführt. In der Datei findet man dann aber auch nur:

```
#define bool  _Bool
#define true  1
#define false 0
```

Die Kontrollstrukturen fassen aber trotzdem weiterhin jeden Wert `!= 0` als true und `0` als false auf. Deswegen schreiben C-Programmierer völlig unverkrampft Code wie den folgenden – auch heute noch:

```
int i = 7;

while (i--) {
    printf("%d, ", i);
    /* Ausgabe: 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0, */
}
```

if-else-Anweisung bietet eine zweiseitige Auswahl

- Syntax: `if (BEDINGUNG) { TRUE-ZWEIG } else { ELSE-ZWEIG }`
- wenn die logische Bedingung erfüllt ist, wird der True-Zweig ausgeführt, andernfalls der Else-Zweig

```
if (antwort == 42) {
    printf("Die Antwort auf alle Fragen");
} else {
    printf("Keine Antwort");
}
```

Konventionen für Formatierung von `if`

- Leerzeichen zwischen `if` und `(`

- Leerzeichen zwischen) bzw. `else` und {
- Kein Leerzeichen zwischen (bzw.) und Bedingung
- `else` in selbe Zeile wie } oder direkt darunter
- True- und False-Zweig werden vier Leerzeichen eingerückt

4.3 Mehrfachverzweigung mit if-else-if [46]

if-else-if-Anweisung bietet eine Mehrfachverzweigung

- Eigentlich nur eine Verschachtlung mehrerer if-else-Anweisungen
- Wird speziell formatiert, um besser lesbar zu sein
- Beliebig viele `else if`, nur ein `else`

Syntax

```
if (BEDINGUNG1) {
    TRUE-ZWEIG1
} else if (BEDINGUNG2) {
    TRUE-ZWEIG2
} else if (BEDINGUNG3) {
    TRUE-ZWEIG3
} else {
    ELSE-ZWEIG
}
```

```
if (temp < 10) {
    printf("Viel zu kalt");
}
else if (temp < 20) {
    printf("Kalt");
}
else if (temp > 50) {
    printf("Viel zu warm");
}
else if (temp > 30) {
    printf("Warm");
}
else {
    printf("Alles super");
}
```

Die Reihenfolge der Bedingungen ist natürlich entscheidend, da nach dem ersten Treffer die anderen Zweige nicht mehr betrachtet werden. Es wäre also falsch, die ersten beiden Bedingungen zu tauschen, weil dann sowohl bei 9 als auch bei 19 Grad immer die Ausgabe „Kalt“ gemacht würde.

Falsche Reihenfolge

```
if (temp < 20) {
    printf("Kalt");
}
else if (temp < 10) {
    /* Wird nie erreicht! */
    printf("Viel zu kalt");
}
```

4.4 Mehrfachverzweigung mit switch [48]

switch-Anweisung bietet andere übersichtlichere Form der Mehrfachverzweigung

Syntax

```
switch (VARIABLE) {
    case WERT1:
        ANWEISUNGEN;
        break;
    case WERT2:
        ANWEISUNGEN;
        break;
    ...
    default:
        ANWEISUNGEN;
}
```

Besonderheiten

- `VARIABLE`: muss eine Ganzzahl (`int`) sein
- `WERT`: ein möglicher Wert der Variable als Literal oder Konstante
- `default`: Zweig der ausgeführt wird, wenn kein Wert vorher gepasst hat

```
switch (monat) {
    case 2: tage = 28; break;
    case 4: tage = 30; break;
    case 6: tage = 30; break;
    case 9: tage = 30; break;
    case 11: tage = 30; break;
    default: tage = 31;
}
```

Die Variable, die im switch-Statement verwendet wird (hier `monat`) muss entweder zuweisungskompatibel mit dem Typ `int` sein (`short`, `char`, `int`) oder es muss sich um einen Aufzählungstyp handeln

(`enum`). Es ist nicht möglich im switch-Statement Variablen von anderen Typen zu verwenden, d. h. `double`, `float` etc. sind nicht verwendbar.

Die Werte in den `case`-Ästen müssen Konstanten vom Typ `int` sein. Sie brauchen keinen expliziten Block zu schreiben, d. h. anders als beim `if` bezieht sich der `case`-Ast auf alle Statements bis zum nächsten `case` oder `break`. Gleichzeitig entsteht aber kein neuer Scope und das `case` muss ein Statement enthalten. Wollen Sie in einem `case` eine Variable definieren und dort verwenden, müssen Sie einen Block einsetzen.

```
#include <stdio.h>

int main() {
    int selection = 0;

    switch (selection) {
        case 0: {
            /* Block, damit Deklaration von k möglich wird */
            int k = 1;
            k--;
            printf("%d\n", k);
            break;
        }
        case 1:
            printf("%d\n", 1);
    }
}
```

Der `default`-Ast wird ausgeführt, wenn keine der Case-Konstanten gepasst hat.

Bei C fällt bei einem switch-Statement der Kontrollfluss durch alle case-Statements, die auf das `case` folgen, bei dem die Bedingung zutraf. Daher muss man immer explizit ein `break;` hinter die case-Statements schreiben, wenn man dieses Verhalten nicht möchte, was fast immer der Fall ist.

Konventionen für *Formatierung* von switch

- Leerzeichen zwischen `switch` und `(`
- Leerzeichen zwischen `)` und `{`
- Kein Leerzeichen zwischen `(` bzw. `)` bei Variable
- `case` jeweils um vier Leerzeichen eingerückt
- Anweisungen hinter `:` von `case` oder darunter, acht Leerzeichen eingerückt

4.5 Fragezeichen-Operator [51]

- Bedingungen mit `if` und `case` können nicht in Ausdrücken eingesetzt werden
- Für die Verwendung in Ausdrücken gibt es einen speziellen *Bedingungsoperator* (*Fragezeichen-Operator*)
- Einziger Operator in C mit *drei* Operanden (*ternärer Operator*)

- Syntax: `BEDINGUNG ? TRUE-WERT : FALSE-WERT`

Beispiel: Absolutbetrag

Mit if

```
if (a < 0) {
    b = -a;
}
else {
    b = a;
}
```

Mit Fragezeichen-Operator

```
b = a < 0 ? -a : a;
```

4.6 while-Schleife [53]

- *while-Schleife* *(while loop)* prüft *vor* jedem Durchlauf eine Bedingung (Vergleichsausdruck)
- *kopfgesteuert* und *abweisend*
- Syntax: `while (BEDINGUNG) { ANWEISUNGEN }`

```
while (antwort < 42) {
    antwort++;
}
```

Der Rumpf der `while`-Schleife wird nur betreten, wenn die Bedingung des Ausdrucks wahr ist. Wenn man eine Schleife wünscht, die mindestens einmal durchlaufen wird, muss man die `do`/`while`-Schleife wählen. Die Variable auf die getestet wird sollte richtig initialisiert sein und man sollte nicht vergessen sie im Schleifenrumpf zu verändern, da man andernfalls in einer Endlosschleife landet.

Wenn die Anzahl der Schleifendurchläufe schon im Voraus feststeht, sollten Sie die `for`-Schleife verwenden. Das hier gewählte Beispiel ist also nicht optimal, da man es besser mit for implementiert hätte. `while` ist gut geeignet für Schleifen, bei denen während des Durchlaufens erst festgestellt werden kann wann der Abbruch erfolgen soll, z. B. bei linearen Suchen etc.

```
/* Beispiel: Gib alle Zahlen von 1 bis 10 aus */
int i = 1;
while (i <= 10) {
    printf("%d\n", i);
    i++;
}
```

```c
/* Beispiel: Berechne Summe der Zahlen von 1 bis 10 */
int i = 1;
int summe = 0;
while (i <= 10) {
    summe += i;
    i++;
}
printf("%d\n", summe);
```

4.7 do-while-Schleife [55]

do-while-Schleife *(do-loop)* ist *fußgesteuert* (*nicht abweisend*)

- Syntax: `do { ANWEISUNGEN } while (BEDINGUNG);`

```c
do {
    n = readNatuerlicheZahl();
} while (n >= 0);
```

Der Rumpf der `do`/`while`-Schleife wird immer mindestens einmal betreten, da der Test erst am Ende erfolgt. Wenn man eine Schleife wünscht, die die Bedingung vorher testet, muss man die `while`-Schleife verwenden. Die Variable auf die getestet wird sollte richtig initialisiert sein und man sollte nicht vergessen sie im Schleifenrumpf zu verändern, da man andernfalls in einer Endlosschleife landet.

Wenn die Anzahl der Schleifendurchläufe schon im Voraus feststeht, sollten Sie die for-Schleife verwenden. Das hier gewählte Beispiel ist also nicht optimal, da man es besser mit `for` implementiert hätte.

```c
/* Beispiel: Gib alle Zahlen von 1 bis 10 aus */
int i = 1;
do {
    printf("%d\n", i);
    i++;
} while (i <= 10);
```

```c
/* Beispiel: Berechne Summe der Zahlen von 1 bis 10 */
int i = 1;
int summe = 0;
do {
```

```
    summe += i;
    i++;
} while (i <= 10);

printf("%d\n", summe);
```

4.8 for-Schleife [57]

for-Schleife *(for-loop)* ist *kopfgesteuerte* (*abweisende Schleife*)

- bietet mehr Möglichkeiten als die while-Schleife
- Syntax: `for (INIT; BEDINGUNG; UPDATE) { ANWEISUNGEN }`
  - `INIT`: initialisiert Variablen (optional)
  - `BEDINGUNG`: Schleife läuft, solange die Bedingung wahr ist
  - `UPDATE`: Operationen, die nach jedem Durchlauf durchgeführt werden

```
int i;
for (i = 0; i < 10; i++) {
    /* tu was */
}
```

Wenn man Java gewöhnt ist, wird man sich wundern, warum die Variable `i` nicht in der `for`-Schleife deklariert wird. Der Grund liegt darin, dass bis zum C99-Standard Variablen nur am Anfang eines Blocks deklariert werden durften. Erst mit C99 kam die Möglichkeit, Variablen auch an anderer Stelle, z. B. in dem Initialisierungsteil einer `for`-Schleife erstmals einzuführen. Der vorhergehende Standard (ANSI-C bzw. C89) kannte diese Erweiterung noch nicht.

Wenn Sie nicht wissen, auf welcher Plattform, mit welchem C-Compiler Ihr Code später einmal compiliert werden wird, sollten Sie auf die Deklaration im `for` verzichten.

```
/* Beispiel: Gib alle Zahlen von 1 bis 10 aus */
int i = 0;
for (i = 1; i <= 10; i++) {
    printf("%d\n", i);
}
```

```
/* Beispiel: Berechne Summe aller Zahlen von 1 bis 10 */
int summe = 0;
int i;
```

```
for (i = 1; i <= 10; i++) {
    summe += i;
}

printf("%d\n", summe);
```

4.9 Schleifenabbruch [59]

Aktueller Schleifendurchlauf kann abgebrochen werden

- *break;* – Schleife wird ganz verlassen
  (Sprung an die Anweisung nach der Schleife)
- *continue;* – Beginnt sofort einen neuen Schleifendurchlauf
  (Sprung in die Prüfung der Bedingung)

Wird häufig als schlechter Programmierstil angesehen. Alternativen

- boolesche Kontrollvariable als Ersatz für `break`
- zusätzliches `if` als Ersatz für `continue`

```
/* Suche kleinste Zahl, die durch 8 und 14 teilbar ist (mit break) */
int i;
for (i = 1; i <= 8*14; i++) {
    if ((i % 8 == 0) && (i % 14 == 0)) {
        printf("%d\n", i);
        break;
    }
}
```

```
/* Suche kleinste Zahl, die durch 8 und 14 teilbar ist (ohne break) */
int gefunden = 0;
int i;
for (i = 1; i <= 8*14 && !gefunden; i++) {
    if ((i % 8 == 0) && (i % 14 == 0)) {
        printf("%d\n", i);
        gefunden = 1;
    }
}
```

4.10 Das goto [61]

- Anders als Java besitzt C noch einen `goto` Befehl
- `goto LABEL` springt zum Label `LABEL`
- Kann nur innerhalb derselben Funktion angewandt werden

```
int i = 0;

jump_here:

/* Schleife mit goto. Pfui! */
if (i < 5) {
    printf("i=%d\n", i);
    i++;
    goto jump_here;
}
```

In Java ist `goto` zwar als Schlüsselwort reserviert aber nicht in der Sprache implementiert. In C hingegen hat es eine Funktion.

Über Funktionsgrenzen hinweg kann in C mit der Funktion `_longjmp` gesprungen werden.

4.11 Codekonventionen [62]

- Hinter `do`, `for` und `while` ein Leerzeichen
- Vor und hinter den Operatoren ein Leerzeichen
- falls Blockanweisung:
  - `)` und `{` in dieselbe Zeile, durch Leerzeichen getrennt
  - `}` unter i von `if` bzw. w von `while`
- innere Anweisungen um 4 Spalten einrücken
- geschachtelte Schleifen vermeiden (→ Prozeduren)

Kapitel 5

Operatoren

5.1 Zuweisung [64]

```
a = 5
```

- *Linke* Seite der Zuweisung
  → Variable (*lvalue*)
- *Rechte* Seite der Zuweisung
  → Ausdruck dessen Ergebnis zugewiesen wird (*rvalue*)
- Unterschiedliche Typen rechts und links ⇒ Typkonvertierung
- Ergebnis der Zuweisung ist wieder ein Wert
  `a = b = c = d = e = 0;`
  `a = (b = (c = (d = (e = 0))));`

Die Unterscheidung in *lvalue* und *rvalue* ist bei C eine recht wichtige, weil der C-Standard sich häufig auf diese Begriffe bezieht. Außerdem neigt der Compiler dazu, Fehlermeldungen ebenfalls mit einem Hinweis auf diese zu garnieren.

Folgendes (fehlerhafte) C-Programm-Fragment

```
int k = 0;
k++ = 3;
```

führt beim gcc zu der Fehlermeldung

```
<source>:4:6: error: lvalue required as left operand of assignment
    4 |     k++ = 3;
      |     ~^~
```

Interessanterweise ist `++k = 3;` korrekt: `k++` ist *kein lvalue*, `++k` aber schon.

Folgende Ausdrücke sind in C ein lvalue:

- Name einer Variable (`k`)
- Zuweisung, wenn rechts wieder ein lvalue steht (`k = j`)
- Pre-Increment oder Pre-Dekrement (`++k`, `--k`)
- dereferenzierter Pointer (`*p`)
- Array-Elementzugriff (`a[3]`)
- Zugriff auf ein `struct`-Member (`s.m`)
- Zugriff auf ein `struct`-Member über einen Pointer (`s->m` oder `(*s).m`)
- Ternärer Ausdruck, wenn alle Rückgaben lvalues sind (`(x < y ? y : x)`)

Die Regel ist, dass nur diese lvalues auf der linken Seite einer Zuweisung vorkommen dürfen. Auf der rechten Seite der Zuweisung dürfen rvalues *und* lvalues stehen.

5.2 Ausdruck [65]

Ein *Ausdruck (expression)* verknüpft Operanden mithilfe eines Operators

- *Operand (operand)* ist der Wert (Variablen oder Literale) der verknüpft werden soll
- *Operator (operator)* legt die Art der Verknüpfung fest (z. B. Addition mit +)

```
19 + 7
vermoegenVonBillGates + 1000000
```

Variablen an sich sind nutzlos, solange man mit den Werten, die darin gespeichert sind nicht rechnen kann. Daher benötigt man, wie in der Mathematik *Operatoren*, die es erlauben aus bekannten Werten, neue Werte zu berechnen. Die Berechnung eines neuen Wertes erfolgt mit Hilfe eines *Ausdrucks*, z. B. `2 + 7`. Ein Ausdruck besteht aus

- *Operanden* die Werte miteinander verknüpfen (im Beispiel 2 und 7)
- *Operatoren* welche die Art der Verknüpfung festlegen (im Beispiel +)

Bei typsicheren Sprachen, wie C, ist eine der wichtigen Fragen, welchen *Typ* das Ergebnis der Operation hat. Bei vielen Operatoren hängt der Typ des Ergebnisses vom Typ der Operanden ab. So ist z. B. der Typ von `5 + 2` `int`, weil beide Operanden vom Typ `int` sind. Der Typ von `5 + 2.0` ist allerdings vom Typ `double`, weil ein Operant vom Typ `double` ist.

5.3 Arten von Operatoren [66]

Drei Arten von Operatoren

- *Unäre Operatoren* haben nur einen Operanden

  - Syntax: `op Operand`
  - Beispiel: Negation einer Zahl (`a = -b`)
- *Binäre Operatoren* verknüpfen zwei Operanden
  - Syntax: `Operand1 op Operand2`
  - Beispiel: Multiplikation zweier Zahlen (`a = b * c`)
- *Ternäre Operatoren* verknüpfen drei Operanden (selten)
  - Syntax: `Operand1 op Operand2 op Operande3`
  - Beispiel: Bedingter Ausdruck (`x = a > b ? a : b`)

Man kann Operatoren danach klassifizieren, wie viele Operanden sie haben. Am häufigsten sind Operatoren mit zwei Operanden (*binäre Operatoren*). Deutlich seltener sind solche mit nur einem Operanden (*unäre Operatoren*). Mit drei Operanden (ternärer Operator) existiert in C nur ein einziger Operator, der sogenannte *Fragezeichen-Operator*, der später noch behandelt werden wird.

In C gibt es folgende unären Operatoren:

- Negation (-)
  `a = -b`
- Increment(++)
  `a++`
- Decrement (--)
  `a--`
- NOT (!)
  `b = !a`
- Complement (~)
  `b = ~a`
- Address-Operator (&)
  `p = &a`
- Indirektion (*)
  `*p = 7`
- `sizeof()`
  `x = sizeof(int)`
- Cast (`(TYPE)`)
  `a = (int) 2.0`

5.4 Rangfolge der Operatoren [67]

- *Rangfolge (priority)* legt fest, welche Operatoren zuerst ausgewertet werden (vgl. „Punkt vor Strichrechnung“ in der Mathematik)

- *Assoziativität* legt fest, in welcher Richtung Operatoren mit gleicher Rangfolge ausgewertet werden
  - *links-assoziativ*: Auswertung erfolgt von Links nach Rechts
    `3 + 5 + 6` ⇔ `(3 + 5) + 6`
  - *rechts assoziativ*: Auswertung erfolgt von Rechts nach Links
    `a = b = c` ⇔ `a = (b = c)`
- Durch *Klammern* kann die Rangfolge geändert werden
  `(2 + 2) * 2 = 8`
- Im Zweifelsfall sollte man lieber Klammern setzen, als sich auf die Rangfolge zu verlassen:
  `2 + (2 * 2)`

Da häufig mehrere Operatoren aufeinandertreffen, muss man festlegen, welche Operatoren zuerst ausgewertet werden. Diese Reihenfolge wird durch die *Rangfolge* der Operatoren eindeutig bestimmt, d. h. für jeden Operator ist festgelegt, vor welchen anderen Operatoren er ausgewertet wird.

Wenn ein Ausdruck mehrere Operatoren mit identischer Rangfolge enthält, wird die Richtung der Ausführung durch die *Assoziativität* bestimmt.

Zum Beispiel sind Multiplikations- und Modulo-Operator linksassoziativ. Daher sind die beiden folgenden Anweisungen austauschbar:

```
int result = 5 * 70 % 6; /* ergibt 2 */
int result = (5 * 70) % 6; /* ergibt 2 */
```

Nicht aber

```
int result = 5 * (70 % 6); /* ergibt 20 */
```

Rechtsassoziativ sind zum Beispiel die Vorzeichenoperatoren (+, –) oder die Zuweisung. Hier wird der Ausdruck von rechts nach links ausgewertet.

```
int summe;
int result = summe = 12; /* summe ist 12, result ist 12 */
```

5.5 Bitweise Operatoren [68]

In C wird sehr viel mit maschinennahen Daten operiert, weswegen die *bitweisen Operatoren* eine besondere Bedeutung haben.

bitweisen Operatoren

- arbeiten auf den Bits eines Wertes
- Eingabe: zwei Zahlen &, ^, <<, >> und | bzw. eine Zahl bei ~
- Ergebnis: eine Zahl

Operator	Bedeutung	Beispiel	Beispiel	Ergebnis
&	Bitweise UND	`x & y`	`13 & 1`	1
|	Bitweise ODER	`x | y`	`13 | 1`	13
^	Bitweise XOR	`x ^ y`	`13 ^ 11`	6
~	Bitweise NOT	`~ x`	`~13`	–14
<<	Shift left	`x << y`	`13 << 1`	26
>>	Shift right	`x >> y`	`13 >> 1`	6

Die Operatoren &, ^ und |arbeiten auf den einzelnen Bits einer Zahl, d. h. man kann es sich so vorstellen, als ob jede einzelne Stelle einer Zahl in ihrer Binärdarstellung des einen Operanden mit dem korrespondierenden Bit des anderen Operanden verknüpft wird.

```
   1101 (13)        1101 (13)        1101 (13)
&  0001 ( 1)     |  0001 ( 1)     ^  1011 (11)
------------     ------------     ------------
 = 0001 ( 1)      = 1101 (13)      = 0110 ( 6)
```

Der Not-Operator (oder auch *Complement Operator*) bildet das *1er-Komplement* seines Operanden. Für das 2er-Komplement muss noch 1 addiert werden.

16bit-Integer

```
      0000000000001101 (13)
~     1111111111110010 (-14)
```

Die Shift-Operatoren verschieben die Bits nach rechts bzw. links.

```
1101 >> 1 = 0110 (6)         1101 << 1 = 11010 (26)
```

5.6 Logische Operatoren [69]

- *Logische Operatoren* verknüpfen Wahrheitswerte miteinander
- Eingabe: zwei Wahrheitswerte (true oder false) && und || bzw. ein Wahrheitswert bei !
- Ergebnis: eine Wahrheitswert (true oder false)

Operator	Bedeutung	Beispiel	Ergebnis
&&	und	`true && false`	`false`
||	oder	`true || false`	`true`
!	nicht	`!false`	`true`

Wie bereits erläutert, kennt C keine wirklichen logischen Datentypen, sondern bildet – selbst im neusten Standard – wahr und falsch auf `1` und `0` ab. Deswegen kann man anstelle der vordefinierten Werte `true` und `false` (aus `stdbool.h`) auch einfach mit den Zahlen `0` und `1` hantieren:

```
printf("1 || 0 = %d\n", 1 || 0);
printf("1 && 0 = %d\n", 1 && 0);
printf("1 && 1 = %d\n", 1 && 1);
printf("!1 = %d\n", !1);
printf("!0 = %d\n", !0);
```

Ausgabe

```
1 || 0 = 1
1 && 0 = 0
1 && 1 = 1
!1 = 0
!0 = 1
```

Sie können sogar beliebige Zahlen einsetzen, d. h. auch Ausdrücke wie `33 && 99` schreiben. Allerdings geben moderne C-Compiler hier eine Warnung aus, dass man möglicherweise nicht weiß, was man tut.

Man kann die bitweisen Operatoren auch zur Auswertung von logischen Ausdrücken verwenden, weil bei der Verwendung von `0` und `1` für `false` und `true`, dasselbe Ergebnis heraus kommt: `1 & 0` $\rightarrow$ `0`, `1 && 0` $\rightarrow$ `0` etc. Trotzdem sollte man das nicht tun, da die logischen Operatoren eine spezielle Eigenschaft haben: Sie sind als *Kurzschlussoperatoren* implementiert.

`&&` und `||` sind sogenannte *Kurzschlussoperatoren*

- `&&` und `||` brechen die Auswertung ab, sobald das Ergebnis feststeht
  - bei `&&` ist ein Ausdruck `false` $\Rightarrow$ gesamter Ausdruck ist `false`
  - bei `||` ist ein Ausdruck `true` $\Rightarrow$ gesamter Ausdruck ist `true`
- `&` und `|` werten den gesamten Ausdruck aus und berechnen dann erst das Ergebnis
- Normalerweise braucht man `&` und `|` nicht und sollte immer `&&` und `||` verwenden

Es gibt in C zwei Arten von Operatoren für Und und Oder, die bitweisen `|` und `&` und die sogenannten Kurzschlussoperatoren `||` und `&&`. Bei den bitweisen Operatoren werden alle (Teil-)Ausdrücke ausgewertet und erst dann wird der Operator angewandt. Bei den Kurzschlussoperatoren wird die Auswertung streng von links nach rechts durchgeführt und sie wird abgebrochen, sobald der logische Wert des Gesamtausdrucks feststeht.

Da ein Abbruch der Auswertung in nahezu allen Fällen im Interesse des Programmierers liegt, sollten immer die Kurzschlussoperatoren zum Einsatz kommen.

Das folgende Beispiel zeigt, warum die bitweisen Operatoren problematisch für logische Tests sind:

```c
int *p = NULL;

if (p != NULL & *p > 7) {
     /* Absturz, weil p dereferenziert wird */
     printf("%s\n", "Wert ist größer als 7");
}
```

Das Programm stürzt ab, weil im Ausdruck `p != NULL & *p > 7` erst beide Operanden ausgewertet werden, bevor die bitweise Operation durchgeführt wird. Da `p` aber `NULL` ist, stürzt das Programm bei dem Versuch, den Pointer über `*p*` zu dereferenzieren ab. Korrekt müsste die Bedingung `p != NULL && *p > 7` heißen. Durch den Kurzschlussoperator wird der zweite Teil des Ausdrucks nie ausgewertet, wenn `p` den Wert `NULL` hat.

Wie fügen sich die logischen Operatoren in die Rangfolge der anderen Operatoren ein? Alle stehen vor der Zuweisung und Negation und Vergleich haben einen höheren Rang als die UND- bzw. ODER-Verknüpfung.

Rang	Operator	Assoziativität
1.	!	R
2.	==	L
2.	!=	L
3.	&&	L
4.	||	L
5.	=	R

Diese Rangfolge hat den Vorteil, dass man in den gängigsten Fällen auf Klammern verzichten kann. Insbesondere kann man das Ergebnis einer logischen Verknüpfung einer Variable zuweisen, ohne klammern zu müssen: `int a = !b == c;`

5.7 Arithmetische Operatoren [72]

Arithmetische Operatoren für *ganze Zahlen*

- Eingabe: zwei ganze Zahlen (`char`, `short`, `int`, `long`)
- Ergebnis: eine ganze Zahl (`int`, `long`)
- Division durch 0 führt zu einem Laufzeitfehler (`5 / 0`)

Operator	Bedeutung	Beispiel	Ergebnis
+	Addition	39 + 3	42
-	Subtraktion	26 - 3	23
*	Multiplikation	19 * 7	133
/	Division	19 / 7	2
%	Modulo	19 % 7	5

Die arithmetischen Operatoren für ganze Zahlen sind alle bereits aus der Mathematik bekannt, werden nur teilweise durch andere Zeichen repräsentiert.

Der Modulo-Operator kommt in der Schulmathematik selten zum Einsatz, hat in der Informatik aber eine überragende Rolle, da viele Problemlösungen auf Module-Arithmetik beruhen, z. B. die *Hashtabellen.*

Arithmetische Operatoren für *Fließkommazahlen*

- Eingabe: zwei Zahlen (davon *mindestens* eine Fließkommazahl)
- Ergebnis: eine Fließkommazahl

Operator	Bedeutung	Beispiel	Ergebnis
+	Addition	39.1 + 3.3	42.4
-	Subtraktion	26.0 - 3	23.0
*	Multiplikation	19.3 * 7.8	150.54
/	Division	37.41 / 4.3	8.7
%	Modulo	19.0 % 7	5.0

5.8 Zusammengefasste Operatoren [74]

Zuweisung und Rechnung können zusammengefasst werden (häufig unübersichtlich)

Operator	Bedeutung
a += b	a = a + b
a -= b	a = a - b
a *= b	a = a * b
a /= b	a = a / b
a %= b	a = a % b

Man kann den Zuweisungsoperator mit den arithmetischen Operatoren kombinieren. Die so entstehenden Konstrukte sind manchmal unübersichtlich und sollten mit Vorsicht eingesetzt werden.

5.9 Vergleichsoperatoren [75]

Numerische Vergleichsoperatoren verknüpfen Zahlen miteinander

- Entsprechen den bekannten Operatoren aus er Mathematik
- Eingabe: zwei ganze Zahlen oder Fließkommazahlen
- Ergebnis: eine Wahrheitswert (true oder false)

Operator	Bedeutung	Beispiel	Ergebnis
<	kleiner	8 < 9	true
>	größer	9 > 4	true
<=	kleiner gleich	7 <= 3	false
>=	größer gleich	7 >= 3	true
==	gleich	6 == 5	false
!=	ungleich	6 != 5	true

Die Tabelle für die Fließkommazahlen ist identisch – abgesehen von den Beispielen.

Operator	Bedeutung	Beispiel	Ergebnis
<	kleiner	8.0 < 9.0	true
>	größer	9.0 > 4.0	true
<=	kleiner gleich	7.0 <= 3.0	false
>=	größer gleich	7.0 >= 3.0	true
==	gleich	6.0 == 5.0	false
!=	ungleich	6.0 != 5.0	true

Vergleich zweier Fließkommazahlen mit ==

- Fließkommazahlen sind mit Ungenauigkeit behaftet
- Vergleich mit == schlägt häufig wegen Rundungsfehlern fehl
- Daher besser mit Epsilon-Umgebung vergleichen
  statt `a == b` besser `(a + epsilon > b) && (a - epsilon < b)`

```c
double a = 3.0;
double b = 0.1;
double c = a * b; /* -> 0.30000000000000004 */

/* schlägt wegen Rundungsfehler fehl */
printf("%d\n", c == 0.3); /* false (0) */

/* besser *
printf("%d\n", (c - 0.00001 < 0.3) && (c + 0.00001 > 0.3)); /* true (1) */
```

5.10 Inkrement und Dekrement-Operator [77]

Für die sehr häufige Operation des Erhöhen und Erniedrigen einer Zahl um den Wert 1 gibt es spezielle Operatoren (*Inkrement-Operator* und *Dekrement-Operator*) → Nur auf *lvalue* anwendbar

- *Präfix-Operator* (`++a` und `--a`) verändern den Wert der Variable und geben diesen zurück
- *Postfix-Operator* (`a++` und `a--`) geben den Wert der Variable zurück und verändern sie erst danach

Operator	Bedeutung
`a++`	`a = a + 1`
`++a`	`a = a + 1`
`a--`	`a = a - 1`
`--a`	`a = a - 1`

Eine der häufigsten arithmetischen Operationen ist das Erhöhen oder Erniedrigen einer ganzen Zahl um den Wert Eins. Daher gibt es für diesen Fall zwei (genaugenommen vier) Operatoren, nämlich ++ und --, die auf eine Variable (nicht auf einen Wert) angewendet werden können.

Eine für Einsteiger schwer verständliche Eigenschaft der Operatoren ist, welchen Wert der Ausdruck selber zurückliefert. In jedem Fall wird die Variable erhöht oder erniedrigt. Von der Position des Operators (vor oder hinter der Variable) hängt aber ab, welchen Wert der Ausdruck zurückgibt. Steht der Operator vor der Variable, wird zuerst die Variable verändert und dann wird das Ergebnis zurückgeben. Steht der dahinter, wird erst der Wert der Variable zurückgegeben und dann der Wert erhöht.

Steht der Operator nicht in einer Zuweisung oder einer Bedingung, ist es egal, welche Form man verwendet. Es hat sich aber bei den meisten Programmierern eingebürgert, dann die Postfix-Schreibweise (`a++`) zu verwenden.

```c
int a = 7;
int b = a++;
printf("a=%d, b=%d\n", a, b); /* a=8, b=7 */
```

```c
int a = 7;
int b = a--;
printf("a=%d, b=%d\n", a, b); /* a=6, b=7 */
```

```c
int a = 7;
int b = ++a;
printf("a=%d, b=%d\n", a, b); /* a=8, b=8 */
```

```c
int a = 7;
int b = --a;
printf("a=%d, b=%d\n", a, b); /* a=6, b=6 */
```

5.11 Komma-Operator [79]

Ein verwirrender Operator in C ist der *Komma-Operator*. Er erlaubt es an Stellen, die nur einen Ausdruck erlauben, mehrere Ausdrücke zu verwenden, die alle ausgewertet werden.

- Syntax: `Ausdruck1, Ausdruck2`
  - `Ausdruck1` wird ausgewertet, das Ergebnis wird weggeworfen
  - `Ausdruck2` ausgewertet und dessen Ergebnis wird verwendet
- nur sinnvoll, wenn `Ausdruck1` einen Seiteneffekt hat

```c
int x = 42;
int y = 23;

int z;
z = (x++, y++);
printf("x=%d, y=%d, z=%d\n", x, y, z); /* x=43, y=24, z=23 */
```

Man braucht den Komma-Operator nicht sehr häufig, er ist aber ausgesprochen nützlich, wenn man in einer `for`-Schleife mit mehreren Laufvariablen arbeiten möchte, wie das folgende Beispiel zeigt.

```c
int x, y;

for (x = 0, y = 1; x < 10; x++, y *= 2) {
    printf("x=%d, y=%d\n", x, y);
}
```

Ausgabe

```
x=0, y=1
x=1, y=2
x=2, y=4
x=3, y=8
x=4, y=16
x=5, y=32
x=6, y=64
```

```
x=7, y=128
x=8, y=256
x=9, y=512
```

Kapitel 6

Fehlerbehandlung

6.1 C und Fehlerbehandlung [81]

Wer bisher Java programmiert hat, ist es gewohnt, eine *strukturierte Fehlerbehandlung* zu bekommen, d. h. ein von der Sprache unterstütztes Konzept, um mit Fehlern umzugehen und sie zu behandeln. C++ und Java bieten *Exceptions* zur Fehlerbehandlung an. C hat aufgrund seines Alters kein entsprechendes Konzept.

- Das *Konzept zur Fehlerbehandlung* in C lässt sich kurz zusammenfassen: *Es gibt kein Konzept*
- Fehler werden durch *spezielle Rückgabewerte* der Funktionen signalisiert
- Aufrufer muss auf den Rückgabewert prüfen und reagieren
  - Fehler behandeln (Fehlerbehandlungsroutine anspringen → goto)
  - Fehler ignorieren
  - Fehler selbst über einen Rückgabewert weitergeben
- Zusätzlich wird eine globale Variable `errno` gesetzt

Während man bei C die fehlende Fehlerbehandlung auf das Alter schieben kann, stellt sich die Frage, warum eine der modernsten Sprachen, nämlich *Go* (2007 erschienen), ebenfalls kein Konzept für Ausnahmen hat. Tatsächlich ist es so, dass Ausnahmen ein durchaus umstrittenes Konzept sind und nicht von allen Entwicklerinnen als die einzige Lösung für das Signalisieren von Problemen angesehen wird. Die Entwickler von Go haben sich entschieden, dass Funktionen beliebig viele Rückgabewerte haben können und dass einer davon zum Anzeigen von Fehlern verwendet wird. Sie empfanden Ausnahmen als zu schwergewichtig und fürchteten, dass es sonst wie bei Java zu einer Flut von Ausnahmen kommt, die niemand mehr behandeln kann und will.

Der folgende Code zeigt ein Beispiel dafür, wie in C mit Fehlern umgegangen wird.

```
if ((servSock = socket(PF_INET, SOCK_STREAM, IPPROTO_TCP)) < 0) {
```

```
    DieWithError("socket () failed") ;
}
/* Bind to the local address */
if (bind(servSock, (struct sockaddr *)&echoServAddr,
       sizeof(echoServAddr)) < 0) {
   DieWithError ("bind () failed");
}
/* Mark the socket so it will listen for incoming connections */
if (listen(servSock, MAXPENDING) < 0) {
   DieWithError("listen() failed") ;
}
for (;;) { /* Run forever */
   /* Wait for a client to connect */
   if ((clntSock = accept(servSock, (struct sockaddr *) &echoClntAddr,
          &clntLen)) < 0) {
       DieWithError("accept() failed");
   }
}
```

Man sieht hier an dem C-Beispiel sehr deutlich die Probleme klassischer Fehlerbehandlung über Rückgabewerte:

- Die normale Programmlogik und die Fehlerbehandlung sind wild gemischt.
- Der Programmcode wird erheblich aufgebläht und sehr unübersichtlich, da manche IFs der Fehlerbehandlung dienen und andere wieder dem normalen Kontrollfluss.
- Der Rückgabewert von Funktionen ist doppeldeutig: Er transportiert sowohl Fehler- als auch normale Informationen.
- Es kann leicht passieren, dass man vergisst einen Fehlercode abzufragen, sodass Fehler überhaupt nicht behandelt werden.
- Es ist sehr schwer Fehler weiterzureichen, da die hier dargestellte Funktion vier verschiedene Fehlersituationen im eigenen Rückgabewert codieren müsste.
- Bei Funktionen, die einen *Pointer zurückgeben* (z. B. `malloc`), wird der Fehler durch `NULL` angezeigt
  ⇒ Fehlercode muss aus `errno` gelesen werden
- Bei Funktionen, die *normalerweise nichts zurückgeben* müssen (z. B. `pthread_create`), wird der Fehlercode *direkt als Rückgabewert* geliefert

6.2 Fehlernummern und Fehlerausgabe [84]

- Die Fehlernummern werden über `#define` definiert und sind spezifisch für die aufgerufenen Funktion (siehe <errno.h>)

  ▶ `#define EPERM 1 /* Operation not permitted */`

```
#define ENOENT   2  /* No such file or directory */
#define ESRCH    3  /* No such process */
#define EINTR    4  /* Interrupted system call */
#define EIO      5  /* Input/output error */
#define ENXIO    6  /* Device not configured */
...
```

- Fehlernummern können mit `strerror(int errnum)` aus `<string.h>` in eine Fehlermeldung übersetzt werden

Beispiel für die Ausgabe eines Fehlers

```c
#include <stdio.h>
#include <errno.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

int main() {
    FILE* f;

    if ((f = fopen("test", "r")) == NULL) {
        printf("%s\n", strerror(errno));
        exit(1);
    }
}
```

Ausgabe

```
No such file or directory
```

6.3 Beispiel: Fehler weitergeben [86]

```c
#define EFOPEN 1

FILE* fd = NULL;

int openFile(const char* file) {
    fd = fopen(file, "r");
    if (fd == NULL) {
        return EFOPEN;
    }
    else {
      return 0;
```

```
    }
}
```

Kapitel 7

Input/Output

7.1 stdio-Bibliothek [88]

In C sind die Eingabe- und Ausgabeoperationen nicht Teil der Sprache, sondern werden durch eine Bibliothek zur Verfügung gestellt. Da diese Bibliothek im C-Standard definiert wird, sollte sie auf allen Plattformen und bei allen C-Compilern zur Verfügung stehen. Ausnahmen sind eingebettete Systeme, die kein Input/Output unterstützen.

Dreh und Angelpunkt der I/O in C ist die *stdio*-Bibliothek, die eine ganze Reihe von Funktionen anbietet.

- Eingabe/Ausgabe wird über die *stdio*-Bibliothek realisiert
  - `#include <stdio.h>`
  - wird automatisch gelinkt
- Definiert den Typ `FILE*` und Funktionen für Dateizugriff
- Definiert `stdin`, `stdout`, `stderr`

`stdin`, `stdout` und `stderr` sind vordefinierte `FILE`-Objekte, die den Zugriff auf die Standard-Ein- und -Ausgabe ermöglichen.

Neben den Funktionen in `stdio.h`, die im C-Standard definiert werden, gibt es eine Reihe von korrespondierenden *Low-Level-I/O-Funktionen*, die vom POSIX-Standard festgelegt werden. Diese Funktionen sind näher am Betriebssystem und bieten weniger Komfort. Außerdem sind sie nur auf Systemen verfügbar, die den POSIX-Standard unterstützen, wozu allerdings die relevanten Betriebssysteme gehören. Deswegen sollte man prinzipiell die C-Standard-Funktionen benutzen und die Low-Level-Funktionen ignorieren.

Beispiele Low-Level-Funktionen sind:

- `int open(const char *pathname, int flags, mode_t mode);`
- `int creat(const char *pathname, mode_t mode);`
- `int close(int fd);`

Ken Thompson, einer der Erfinder von Unix, wurde einmal gefragt, was er heute anders machen würde, wenn er Unix noch einmal entwickeln dürfte. Seine Antwort war „I'd spell creat with an e."

7.2 Dateien öffnen und schließen [89]

`FILE fopen(const char *path, const char *mode)`

- öffnet die Datei `path`
- Modus (`mode`)
  - `"r"`: Lesen
  - `"r+"`: Lesen und schreiben (ab Anfang)
  - `"w"`: Anlegen und schreiben (ab Anfang)
  - `"w+"`: Anlegen, lesen und schreiben (ab Anfang)
  - `"a"`: Schreiben (am Ende anhängen)
  - `"a+"`: Lesen und schreiben (am Ende anhängen)
- bei Erfolg wird ein `FILE*` zurückgegeben, im Fehlerfall `NULL`

`int fclose(FILE *stream)`

- schließt die Datei `stream`
- 0 bei Erfolg, `EOF` im Fehlerfall

```
FILE* handle = fopen("/tmp/file", "r");

if (handle == NULL) {
  /* Fehler */
  exit(0);
}

/* Mit Datei arbeiten */

if (fclose(handle)) {
  /* Fehler beim Schließen */
}
```

Die Standardbibliothek spricht hier von *Streams* und nicht *Dateien*, weil die Metoden auch auf andere Arten von I/O angewendet werden können, z. B. die Console, die keine Datei ist.

7.3 Zeichen-I/O [91]

Funktionen für den Zugriff auf einzelne Zeichen. Alle Funktionen geben `EOF` zurück, wenn Datei/stream zu Ende ist oder ein Fehler auftritt

- `int getchar()`
  Liest das nächste Zeichen von `stdin`
- `int fgetc(FILE *in)`
  List das nächste Zeichen aus Datei `in`
- `int putchar(int c)`
  Schreibt ein Zeichen auf `stdout`
- `int fputc(int c, FILE *out)`
  Schreibt ein Zeichen in Datei `out`

Bemerkenswert ist aber die Tatsache, dass die Funktion `getchar()` ein `int` als Rückgabetyp hat und kein `char`, obwohl ein Stream byteweise gelesen wird. Der größere Datentyp ist nötig, da durch ein `EOF` signalisiert wird, dass der Stream zu Ende ist. `EOF` hat den Wert `-1`. Da aber `-1` ein gültiger char-Wert ist, hat man hier den größeren Datentyp nehmen müssen. Aus diesem Grund ist es *falsch* den Rückgabewert von `getchar()` *vor* dem Vergleich mit `EOF` zu casten. Erst muss mit `EOF` (als `int`) verglichen werden, dann gecastet, sonst bricht der Lesevorgang möglicherweise zu früh ab, nämlich wenn in den Daten zufällig ein `0xFF` vorkommt, das vorzeichenbehaftet einer `-1` entspricht.

Korrekter Umgang mit EOF

```
int c;
FILE* fd = fopen("test.txt", "r");
while ((c = fgetc(fd)) != EOF) {
    printf("%c", (unsigned char) c);
}
```

Dass die `putchar()`- und `fputc()`-Funktionen auch einen `int` und kein `unsigned char` nehmen, dient der Bequemlichkeit des Programmierers, der sich so teilweise einen Cast ersparen kann.

7.4 Zeilen-I/O [92]

Anstatt einzelne Zeichen kann man auch direkt auf Zeilen arbeiten. Die entsprechenden Funktionen akzeptieren bzw. liefern Zeichenketten in Form von `char*`.

Funktionen für den Zugriff auf Zeilen

- `char *fgets(char *buf, int size, FILE *in)`
  - liest die nächste Zeile von `in` in `buf`
  - kehrt bei `'\n'` zurück oder wenn `size - 1` Zeichen gelesen wurden
  - `'\n'` selbst wird auch zurückgegeben
  - gibt Zeiger auf `buf` zurück oder `NULL` im Fehlerfall
  - *auf keinen Fall* `gets(char *)` verwenden ⇒ *Buffer-Overflow*
- `int fputs(const char *str, FILE *out)`

- schreibt den String `str` in die Datei `out`
- stoppt beim `'\0'`
- gibt die Anzahl der geschriebenen Zeichen zurück, oder `EOF` bei Fehler

7.5 Formatierte I/O [93]

- `int fscanf(FILE *in, const char *format, ...)`
  Analog zu `scanf` aber für Datei
- `int fprintf(FILE *out, const char *format, ...)`
  Analog zu `sprintf` aber für Datei
- `int printf(const char *format, ...)`
  ⇔ `fprintf(stdout, format, ...)`

`fscanf(...)` sollte man nicht verwenden. Besser `fgets(str, ...)` zusammen mit `sscanf(str, ...)`

7.6 Von der Console lesen [94]

- Mit `fgets(str, ...)` und `sscanf(str, ...)` kann man Daten von der Konsole lesen

```c
int main() {
    char buffer[255];
    int zahl;
    printf("Bitte geben Sie eine Zahl ein: ");

    if (fgets(buffer, 254, stdin) != 0) {
        sscanf(buffer, "%d", &zahl);
        printf("Die Zahl war %d\n", zahl);
    }
}
```

Ausgabe

```
Bitte geben Sie eine Zahl ein: 62
Die Zahl war 62
```

Index

Wintersemester 2021/2022

Programmierung 3 (PR3) - C-Programmierung

Vorlesung - Hochschule Mannheim

Datentypen und Funktionen

Prof. Thomas Smits

Stand: 15. Mai 2023

hochschule mannheim

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Datentypen

1.1 Standardtypen [5]

Jede Programmiersprache braucht eine gewisse Anzahl von Datentypen, die direkt in der Sprache verstanden werden. Diese können dann vom Entwickler genutzt werden, um weitere (komplexe) Datentypen zu konstruieren.

C hat eine Reihe von *Standarddatenytpen*, die ähnlich zu denen von Java sind

- `char`
- `int`
- `short`
- `long`
- `long long`
- `float`
- `double`
- `long double`

Es fehlt ganz offensichtlich der Datentyp `boolean` und auch die Bit-Breite der Datentypen ist nicht identisch zu Java (siehe unten).

Besonders beachtenswert sind die zusammengesetzten Bezeichnungen: Ein `long` ist etwas anderes als ein `long long` und `long long` bezeichnet – obwohl es *zwei* Worte sind – *einen* Datentyp.

C wurde mit dem Ziel entwickelt, dass sich in C geschriebene Programme auf unterschiedlichen Plattformen (Prozessoren, Betriebssystemen) kompilieren und ausführen lassen. Aufgrund der Maschinennähe von C sollten die Datentypen besonders gut zu dem verwendeten Prozessor auf der Plattform passen, sodass man sich dazu entschieden hat, die Bitbreiten der Datentypen *nicht* zu spezifizieren. Stattdessen fordert der C-Standard einige Beziehungen zwischen den Datentypen.

- Die Breite (in Bits) der Standardtypen ist *nicht* festgelegt und hängt von der Plattform ab

- Der kleinste Datentyp ist immer `char`
- Es gibt nur Relationen zwischen den Typen und Mindestgrößen
  - `long long` (mind. 64 Bit) >= `long`
  - `long` (mind. 32 Bit) >= `int`
  - `int` (mind. 16 Bit) >= `short`
  - `short` (mind. 16 Bit) >= `char`
  - `char` (mind. 8 Bit)

Auf den ersten Blick könnte man denken: „OK, welche Plattform unterstützt denn nicht wenigstens 64bit nativ?“ Die Antwort ist, dass C auch heute noch auf Plattformen eingesetzt wird, die eine Standardbitbreite 16 Bit haben, z. B. diverse Mikrocontroller.

Laut C-Standard, sollte der Datentyp `int` derjenige sein, der von der Plattform am besten unterstützt wird – der *native* Datentyp. Im Allgemeinen heißt das, dass es der Datentyp sein sollte, welcher der Breite der Prozessorregister entspricht.

Es gibt noch eine Reihe von (historisch entstandenen) alternativen Namen für die Datentypen:

Type	Aliases

`short`	`short int`
	`signed short`
	`signed short int`

`unsigned short`	`unsigned short` `unsigned short int`
`int`	`signed` `signed int`
`unsigned int`	`unsigned`

`long`	`long int`
	`signed long`
	`signed long int`

`unsigned long`	`unsigned long int`

`long long`	`long long int`
	`signed long long`
	`signed long long int`

`unsigned long long`	`unsigned long long int`

Im Folgenden ein paar Beispiele für die Bitbreiten der C-Datentypen auf unterschiedlichen Plattformen.

Datentyp	Arduino	MacOS X	Win32	Win64
`char`	8 Bit	8 Bit	8 Bit	8 Bit
`short`	16 Bit	16 Bit	16 Bit	16 Bit
`int`	16 Bit	32 Bit	32 Bit	32 Bit
`long`	32 Bit	64 Bit	32 Bit	32 Bit
`long long`	—	64 Bit	64 Bit	64 Bit
`float`	32 Bit	32 Bit	32 Bit	32 Bit
`double`	32 Bit	64 Bit	64 Bit	64 Bit

Wie man sieht, definieren nur Arduino und Win32 den Datentyp `int` entsprechend der Breiter der Prozessorregister. Die anderen Plattformen haben sich entschieden, `int` bei 32 Bit zu belassen, damit die Kompatibilität mit älteren Programmen gewahrt bleibt.

Ob man mit unterschiedlichen Breiten der Datentypen leben kann, hängt vom Programm ab. Geht es z. B. darum, Netzwerkpakete zu verarbeiten, dann benötigt man Datentypen mit bekannter Bitbreite, um die Daten darin abzulegen. Will man nur ein Zahlenratespiel implementieren oder über ein Array mit einigen Elementen laufen, ist es egal, ob ein `int` 16 oder 32 Bit hat.

Das Problem wird gelöst durch die Definition von Datentypen mit fester Breite. Jetzt hat man die Wahl.

In `stdint.h` werden Typen mit *fester Breite* deklariert, die plattformübergreifend gelten

- `int8_t`
- `int16_t`
- `int32_t`
- `int64_t`
- `uint8_t`
- `uint16_t`
- `uint32_t`
- `uint64_t`

1.2 Wertebereich der Zahlentypen [9]

Anders als in Java, werden die Ganzzahl-Datentypen in C noch einmal darin unterschieden, ob sie mit oder ohne Vorzeichen benutzt werden. Hierfür gibt es weitere Schlüsselworte (`signed` und `unsigned`), die anzeigen, ob ein Datentyp mit oder ohne Vorzeichen gewünscht wird.

- C-Datentypen gibt es mit und ohne Vorzeichen
  - `unsigned` → Ohne Vorzeichen, z. B. `unsigned int`
  - `signed` → Mit Vorzeichen, z. B. `signed int`
  - Ohne Angabe → `signed`, z. B. `int`

- Wertebereich ändert sich durch Vorzeichen

Vorzeichen	Breite	Min	Max
`signed`	8 Bit	-2^7	2^7-1
`signed`	16 Bit	-2^{15}	$2^{15}-1$
`signed`	32 Bit	-2^{31}	$2^{31}-1$
`signed`	64 Bit	-2^{63}	$2^{63}-1$
`unsigned`	8 Bit	0	2^8
`unsigned`	16 Bit	0	2^{16}
`unsigned`	32 Bit	0	2^{32}
`unsigned`	64 Bit	0	2^{64}

Datentyp	Breite	Wertebereich
Fließkomma	32 Bit	+/- $3.402,823,4 * 10^{38}$
Fließkomma	64 Bit	+/- $1.797,693,134,862,315,7 * 10^{308}$

1.3 Literale [11]

Literale erlauben die Angabe von Werten direkt im Quelltext. Hier gibt es wegen der Gemeinsamkeiten von C und Java keine Überraschungen.

- Die Schreibweise von Integer- und Float-*Literalen* in C entspricht der in Java
  - `xxxx` – Integer-Literal in Dezimalschreibweise, z. B. `1299`
  - `0xHHHH` – Integer-Literal in hexadezimaler Schreibweise, z. B. `0xCAFEBABE`
  - `0xxxx` – Integer-Literal in oktaler Schreibweise, z. B. `0777`
  - `xxx.xxx` – Double-Literal
- Durch einen Suffix kann der Datentyp angezeigt werden
  - `L` – long, z. B. `182721L`
  - `LL` – long long, z. B. `18272222LL`
  - `u` – unsigned, z. B. `0x8a632ffeuLL`

1.4 Typumwandlung [12]

C ist eine typsichere Sprache (wie auch Java), d. h. der Compiler überprüft die Typen von Variablen und Literalen bei Zuweisungen und stellt sicher, dass bei der Zuweisung keine inkompatiblen Typen zum Einsatz kommen.

Anders als der Java-Compiler meckert der C-Compiler aber nicht, wenn man einen größeren an einen kleineren Typ (z. B. `long` und `short`) zuweist (*narrowing*), sondern führt die Zuweisung

einfach durch. Wenn der zugewiesene Wert außerhalb des Wertebereichs der Variable liegt, kommt es zu einem Überlauf und Daten gehen verloren. Variablen, deren Typ vorzeichenbehaftet ist, springen dann auch gerne in den negativen Bereich.

- *Implizite Typumwandung*, d. h. ohne *Cast*
  - `char` ↔ `short` ↔ `int` ↔ `long`
  - Wenn ein Operand `double` ist, wird der andere zu `double` konvertiert
  - Wenn ein Operand `float` ist, wird der anderer zu `float`
- *Explizite Typumwandung* mit *Cast*
  - Syntax: `(typ) wert`
  - Analog zu Java
- C-Umwandlungen machen nicht immer das, was man erwartet

Will man eine Typ explizit umwandeln, kann man dazu einen *Cast* verwenden, der mithilfe des *Cast-Operators* `()` eine Umwandlung durchführt.

```c
unsigned char c;
short s;
int i;
long l;
double d;

i = 100000;
s = i; /* narrowing, impliziter Cast */
printf("%d %d\n", i, s); /* 100000 -31072 */

s = (short) i; /* narrowing, expliziter Cast */
printf("%d %d\n", i, s); /* 100000 -31072 */

l = i; /* widening, impliziter Cast */
printf("%d %ld\n", i, l); /* 100000 100000 */
```

Das Beispiel zeigt, dass C einfach den zu großen `int`-Wert `i` in die `short`-Variable `s` presst. Da `s` vorzeichenbehaftet ist, springt der Wert ins Negative um. Warum? Bei der Zuweisung werden einfach die unteren 16 Bit von `i` (`11000011010100000`) in `s` geschrieben `1000011010100000`. Das oberste Bit ist gesetzt, also handelt es sich um eine negative Zahl. Da diese in Zweierkomplementdarstellung vorliegt, müssen wir 1 abziehen und die Bits flippen: `0111100101100000`, um den Wert zu erhalten. Diese ist 31072, unter Beachtung des Vorzeichens also tatsächlich `-31072`.

Die Typumwandlung kann man auch durch einen Cast `s = (short) i` herbeiführen. Am Ergebnis ändert sich allerdings nichts.

```
c = i; /* narrowing, impliziter Cast */
printf("%d %d\n", i, c); /* 100000 160 */

d = 3 / 2; /* Ausdruck ist int */
printf("%f\n", d); /* 1.000000 */

d = 3 / 2.0; /* Ausdruck ist double */
printf("%f\n", d); /* 1.500000 */

d = (double) i;
printf("%f\n", d); /* 100000.000000 */
```

In der letzten Zeile des Beispiels sieht man eine explizite Umwandlung eines `int` in einen `double`-Wert. Hier ist der Compiler immerhin so nett und schreibt nicht das Bitmuster in die Variable, sondern konvertiert den Wert in das korrekte Format für Fließkommazahlen.

1.5 Boolean [15]

- C hat keinen Datentyp für *boolean*
- Wird über `int` oder `char` simuliert
  - `0` = false
  - 1 = true
- Per Definition gilt: <> `0` = true

```
int i = 7;
int bigger;
int smaller;

bigger = i > 8;
smaller = i < 8;

printf("%d\n", bigger); /* -> 0 */
printf("%d\n", smaller); /* -> 1 */
```

Details zu der Frage, wie man in C mit Wahrheitswerten umgeht, wurden bereits im Abschnitt zu den Kontrollstrukturen diskutiert.

1.6 Eigene Typen [16]

- Mit `typedef TYP NAME` kann man eigene Typen definieren
- Besonders wichtig für `struct` und `enum` (siehe unten)

```
typedef short int smallNumber;
typedef unsigned char byte;

smallNumber x;
byte b;
```

Hierbei bezeichnet `TYP` einen vorhandenen Datentyp und `NAME` gibt den Namen für den neu zu definierenden Typ an.

Auf den ersten Blick wirkt es etwas unnötig, dass man für einen vorhandenen Datentyp wie `short int` mit einem neuen Namen `smallNumber` zu versehen. Es gibt aber drei wichtige Einsatzzwecke für `typedef`:

- Datentypen plattformunabhängig definieren
- Enumerationen deklarieren
- Strukturen deklarieren

1.7 Enumerationen [17]

Häufig benötigt man einen Aufzählungsdatentyp, mit dem man eine Auswahl aus einer Reihe von Elementen darstellen kann. Hierzu bietet C *Enumerationen* an.

- Aufzählungstypen (*Enumerationen*) können mit `enum` definiert werden
- Verhalten sich wie `int`

```
typedef enum { Red, Green, Blue } Color;
typedef enum { Rain=1, Snow=2, Wind=4 } Weather;

Color c = Green;
Weather w = Snow;

printf("%d\n", c); /* -> 1 */
printf("%d\n", w); /* -> 2 */
printf("%d\n", w + c + Wind); /* -> 7 */

w = 9; /* Außerhalb des Wertebereiches */
```

Aus Effizienzgründen werden Enumerationen in C intern als `int`-Werte dargestellt. Gibt man bei der Deklaration einer Enumeration keine Zahlenwerte an, werden die Elemente einfach bei 0 beginnend nummeriert. Wie das Beispiel zeigt, kann man aber auch explizit die Werte für die Elemente vorgeben.

C macht allerdings – anders als Java – wenig Anstalten, den Wahren Charakter von Enumerationen als Zahlenwerte zu verbergen. Man kann einfach mit ihnen rechnen und auch Werte zuweisen, die außerhalb des Wertebereiches liegen. C-Enumerationen sind daher *nicht* typsicher.

1.8 Objekte [18]

C ist eine prozedurale Programmiersprache und kennt deswegen keine Objekte. Ein C-Programm besteht aus Funktionen und globalen Daten.

- C hat keine Objekte
- Variablen in einem Block { } sind nur in dem Block gültig (→ Java)
- Variablen außerhalb eines Blocks
  - sind global
  - leben solange das Programm lebt
  - werden mit `static` auf eine Datei beschränkt
- Der Wert einer lokalen Variable ist nach der Deklaration *nicht initialisiert* (↔ Java)

Man kann die Sichtbarkeit von Variablen in C nur auf vier Ebenen kontrollieren:

- *global* → jede Variable, die nicht als `static` gekennzeichnet ist, außerhalb einer Funktion
- *global innerhalb einer Datei* → jede Variable, die als `static` gekennzeichnet ist, außerhalb einer Funktion
- in einer *Funktion* → lokale Variablen in einer Funktion
- in einem *Block* → lokale Variablen in einem Block, in einer Funktion

```c
/* Sichtbar im gesamten Programm */
int global;

/* Sichtbar nur in dieser Datei */
static int file_global;

void f() {
    /* Sichtbar in der ganzen Funktion */
    int function_local;

    {
      /* Sichtbar nur im Block */
```

```
    int block_local;
  }
}
```

Das Schlüsselwort `static` hat in C also eine ganz andere Bedeutung als in Java. Während es in Java die Variable unabhängig vom Objekt macht – also globaler – schränkt es in C die Sichtbarkeit auf die aktuelle Quelltext-Datei ein.

In C besitzen nur globale Variablen nach der Definition einen bekannten Wert. Für lokale Variablen gilt dies nicht, d. h. sie müssen initialisiert werden oder sie tragen einen *undefinierten*, beliebigen Wert.

```c
#include <stdio.h>

int global;

void f() {
  int local; /* Zuweisung fehlt hier */
  printf("global=%d, local=%d", global, local);
}

int main() {
  f();
  return 0;
}
```

Ausgabe

```
global=0, local=21849
```

Der Wert ist nicht wirklich beliebig, sondern repräsentiert die Daten, die aus vorangegangenen Funktionsaufrufen auf dem Stack an der entsprechenden Stelle gespeichert sind. Mit der Option `-Wall` würde der C-Compiler vor diesem Problem warnen:

```
initialization.c:7:3: warning: 'local' is used uninitialized in this
                              function [-Wuninitialized]
    7 |   printf("global=%d, local=%d", global, local);
      |   ^~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
```

Welche Größe haben Datenobjekte in C?

- Alle Datenobjekte in C haben eine feste Größe während ihrer Lebenszeit (Ausnahme: Dynamisch erzeugte)

- Größe wird bei der Erzeugung festgelegt
  - Globale Variablen beim Kompilieren (Daten-Segment)
  - Lokale Variablen beim Funktionsaufruf (Stack)
  - Dynamische Daten durch den Programmierer (Heap)

Kapitel 2

Pointer

2.1 Speicherlayout eines Prozesses [21]

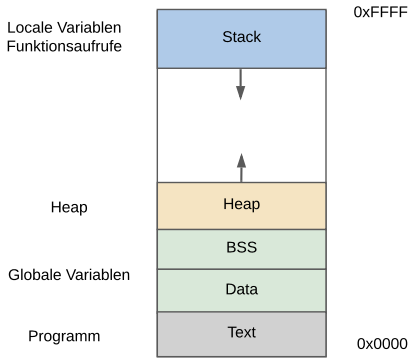
Programme werden vom Betriebssystem als *Prozesse* ausgeführt. Prozesse sind aus Sicherheitsgründen vollständig voneinander isoliert und haben eigene Ressourcen. Vor allem ist der Speicher von Prozessen vollständig getrennt, d. h. ein Prozess kann nicht auf den Speicher eines anderen Prozesses zugreifen. Prozesse können daher nur über den Umweg des Betriebssystems miteinander in Kontakt treten. Die Technik hierzu nennt man *Interprozess-Kommunikation (interprocess communication) IPC*. Beispiele für IPC sind Sockets, Pipes und Shared Memory. Wegen der vollständigen Isolation sind Prozesse relativ schwergewichtig, d. h. das Starten und die Verwaltung von Prozessen benötigt relativ viele Ressourcen.

Innerhalb eines Prozesses gibt es einen oder mehrere *Threads*, die man sich als Ausführungspfade vorstellen kann. Im Gegensatz zu Prozessen sind Threads leichtgewichtiger, d. h. sie lassen sich mit deutlich weniger Aufwand starten und verwalten. Da Threads innerhalb eines Prozesses laufen, haben sie keinen getrennten Heap, sondern teilen sich den Heap und kommunizieren über diesen miteinander. Der Stack ist aber bei Threads getrennt: Jeder Thread hat seinen eigenen Stack.

Der Speicher eines Prozesses besteht aus sechs Teilen.

Prozess-Speicher besteht aus

- Text-Segment
- Daten-Segment
- BSS-Segment
- Heap-Segment
- Stack-Segment
- Programm-Counter



Die Aufgaben der Bereiche sind:

- *Text-Segment* (feste Größe): Enthält den Programmcode und kann zur Laufzeit nicht beschrieben werden. Dafür ist es als Executable gekennzeichnet, d. h. der Program-Counter darf sich bei Adressen befinden, die im Text-Segment liegen.
- *Daten-Segment* (feste Größe): Enthält die globalen, initialisierten Variablen des Programms. Alle globalen Variablen, die einen Wert ungleich `0` haben, liegen im Daten-Segment.
- *BSS-Segment* (feste Größe): Enthält den Speicher für die globalen Variablen, die nicht initialisiert wurden.
- *Heap-Segment* (dynamische Größe): Dynamisch allozierter Speicher, der von der Programmiererin manuell verwaltet wird (siehe unten).
- *Stack-Segment* (dynamische Größe): Dynamisch allozierter Speicher, der für die lokalen Variablen verwendet wird. Das Belegen und Freigeben des Speichers wird automatisch vom Compiler durchgeführt, der Entwickler muss sich nicht darum kümmern. Deswegen werden lokale Variablen in C auch als *automatische Variablen* bezeichnet.
- *Programm-Counter*: Prozessor-Register, das den aktuell auszuführenden Befehl speichert.

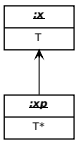
Der Trennung in Daten- und BSS-Segment liegt eine Optimierung zugrunde: Damit die ausführbare Datei (Executable) nicht zu groß wird, enthält sie nur das Text- und Daten-Segment sowie eine Information, wie groß das BSS-Segment sein muss. Das BSS-Segment wird dann vom Betriebssystem beim Laden des Programms anhand dieser Information alloziert, das Executable bläht sich somit nicht unnötig auf.

2.2 Pointer-Typen [23]

Ein zentraler Datentyp in C, den man aus Java nicht kennt, ist der *Pointer*. Ohne Pointer kann man keine komplexeren C-Programme schreiben, weil Pointer die einzige Möglichkeit sind, an Funktionen übergebene Daten zu modifizieren oder dynamisch allozierten Speicher zu verwalten.

Jetzt gibt es allerdings nicht einen einzigen Typ, der Pointer repräsentiert, sondern es gibt genau so viele Pointer-Typen, wie es Datentypen in C gibt und noch einen mehr (`void*`), aber dazu später.

- Jeder Datentyp `T` hat einen passenden *Pointer-Typ* bzw. *Zeigertyp* `T*`
- Der Wert von `T*` ist die Adresse eines Objektes mit dem Typ `T`
- Sei `xp` eine Variable vom Typ `T*` und `x` eine Variable vom Typ `T`
  - `xp = &x` weist `xp` die Adresse von `x` zu
  - `*xp` dereferenziert den Pointer und bezieht sich auf `x`
  - `*xp` hat den Typ `T`



Ein Pointer ist – wie der Namen schon sagt – ein Zeiger auf ein Datenobjekt. Pointer sind genauso Variablen, wie andere auch. Der Inhalt der *Pointervariable* ist die Speicher-Adresse des Datenobjektes, auf das der Pointer zeigt.

Die Adresse eines Datenobjektes erhält man mit dem &-Operator, *Adress-Operator*. Auf das Datenobjekt hinter dem Pointer greift man mit dem *-Operator zu (*Indirektions-Operator*).

```
int x = 7;
int* xp = &x;

printf("xp=%p\n", xp); /* xp=0x7fff5302f7ac */
printf("*xp=%d\n", *xp); /* *xp=7 */
printf("x=%d\n", x);   /* x=7 */

*xp = 42;
printf("xp=%p\n", xp); /* xp=0x7fff5302f7ac */
printf("*xp=%d\n", *xp); /* *xp=42 */
printf("x=%d\n", x);   /* x=42 */
```

Das Beispiel zeigt, wie ein Pointer `xp` auf das Datenobjekt `x` benutzt wird, un die Daten in `x` zu ändern. Die Adresse des Datenobjektes ändert sich nicht, wohl aber sein Inhalt.

Der Format-Ausdruck `%p` im `printf` erlaubt es, die Adresse eines Pointers auszugeben.

Wichtig ist, dass die Typsicherheit von C auch für die Pointer gilt. Das heißt, dass ein Pointer vom Typ `T*` nur auf Objekte vom Typ `T` zeigen kann, der Typ des Objektes „färbt“ also auf den Typ des Pointers ab.

Im Prinzip sind C-Pointer nicht groß unterschiedlich zu Objekt-Referenzen in Java. Auch sie zeigen auf ein Objekt und tragen dessen Adresse in sich. Der Unterschied ist allerdings, dass Java-Referenzen die Information zur Speicher-Adresse des Objektes nicht preisgeben und automatisch dereferenziert werden, somit kein *-Operator benötigt wird.

```
class MyInt {
    // Wir müssen den int in eine Klasse verpacken, weil int
    // ein primitiver Datentyp ist und keine Referenzen erlaubt.
    // Integer scheidet auch aus, weil es immutable ist.
    public int x;

    public MyInt(int x) {
        this.x = x;
    }
}

class Main {
    public static void main(String[] args) {
        MyInt xp = new MyInt(7);
        MyInt xp2 = xp;

        System.out.println("x=" + xp.x); // 7
        System.out.println("x=" + xp2.x); // 7

        xp.x = 42;
        System.out.println("x=" + xp.x); // 42
        System.out.println("x=" + xp2.x); // 42
    }
}
```

2.3 Pointer-Arithmetik [25]

Man kann sich C-Pointer wie Java-Referenzen vorstellen. Allerdings erlaubt C, dass man mit Pointern direkt rechnen kann. Hierbei wird einfach die Adresse, die in dem Pointer gespeichert ist, in für die Rechenoperation verwendet. Der Compiler muss also für die Pointer-Arithmetik kaum Magie betreiben und fasst den Pointer einfach als Zahlenwert auf.

Die einzige Besonderheit ist, dass der Compiler bei Addition und Subtraktion die Größe des Datentyps berechnet, auf den der Pointer zeigt.

Unter *Pointer-Arithmetik* versteht man, dass man mit Pointern rechnen kann

- Pointer können mit == und != verglichen werden

- Pointer können mit ++ inkrementiert und mit -- dekrementiert werden
- Integer können zu Pointern addiert (+) oder subtrahiert (-) werden
- Bei den arithmetischen Operationen wird die Größe des Datentyps berücksichtigt, auf den der Pointer zeigt
  - Bei einem `char*`-Pointer erhöht ++ den Wert um 1
  - Bei einem `int*`-Pointer erhöht ++ den Wert um 4
  - Bei einem `long*`-Pointer erhöht ++ den Wert um 8
  - ...

Das folgende Beispiel zeigt, wie man mithilfe der Pointer-Arithmetik die einzelnen Bytes einer Zahl auslesen kann. Dabei sieht man auch, dass die Zahlen auf Intel-Plattformen im Little-Endian-Format abgelegt sind.

```
typedef unsigned char byte;
int i = 0xcafebabe;
byte* bp = (byte*) &i;

while (bp < (byte*)&i + 4) {
  printf("%x ", *bp & 0xff);
  bp++;
}
```

Ausgabe

```
be ba fe ca
```

Die Funktionsweise des Programms zu verstehen, kann als kleine Übung in Pointer-Arithmetik verstanden werden. Die Casts auf `byte*` sind nötig, da man Pointer unterschiedlichen Typs nicht vergleichen und zuweisen darf. Beachten Sie auch, dass es man die `while`-Schleife auch als `while (bp < (byte*)(&i + 1)) {` hätte schreiben können – es kommt also sehr auf die Klammern an.

2.4 void-Pointer [26]

Nicht immer kennt man den Typ des Objektes, auf das ein Pointer zeigt. Deswegen braucht man einen Pointer-Typ, der auf jedes beliebige Objekt zeigen kann, so wie in Java eine Referenz vom Typ `Object` jedes Objekt referenzieren kann.

Diese Aufgabe übernimmt in C der `void*`-Pointer.

- *Void-Pointer* `void*` ist der generische Pointer
- Kann jedem anderen Pointer zugewiesen werden (mit Cast)

- Jeder andere Pointer kann dem `void`-Pointer zugewiesen Werden
- Verhält sich bei der Pointer-Arithmetik wie ein `char*`-Pointer

```
int* ip;
void* vp = ip;
sizeof(*vp) == 1;
```

Mithilfe eines Casts kann man den `void*`-Pointer einem Pointer eines anderen Pointer-Typs zuweisen.

```
int i = 7;
void* vp = &i;
int* ip = (int*) vp; /* cast von void* auf int*
printf("%d\n", *ip); /* Ausgabe: 7 */
```

Eine Variable vom Typ `void*` kann man nicht dereferenzieren, weil der Compiler den dahinter liegenden Datentype nicht kennen kann. Im obigen Beispiel würde deswegen `*vp = 5;` zu einem Compilerfehler führen. Nur mit einem entsprechendem Cast kann man dem Compiler die nötige Information geben, z. B. `*((int*)vp)`.

```
int i = 7;
void* vp = &i;
printf("%d\n", *((int*)vp) ); /* Ausgabe: 7 */
```

Kommt ein `void*`-Pointer in einem Ausdruck der Pointer-Arithmetik vor, dann wird er wie ein `char*`-Pointer betrachtet, sodass z. B. ein ++ die Adresse um 1 erhöht.

```
char s[] = "Hallo"; /* char[] ist identisch mit char* */
void* vp = s;
printf("%p\n", vp); /* 0x7ffd650d9126 */
vp++;
printf("%p\n", vp); /* 0x7ffd650d9127 */
```

2.5 NULL-Pointer [27]

Welchen Wert hat ein Pointer, der auf nichts zeigt? Java verwendet hier für seine Referenzen den Wert `null`, C einfach den Zahlenwert `0`, da `0` keine gültige Adresse ist. Da aber `0` keine Adresse ist, ist der technisch korrekte Wert des sogenannten Null-Pointers `(void*) 0`.

Will man ausdrücken, dass ein Pointer auf nichts zeigt, setzt man ihn auf `0` (*NULL*) → *null pointer*

> An integer constant expression with the value 0, or such an expression cast to type void *, is called a null pointer constant. If a null pointer constant is converted to a pointer type, the resulting pointer, called a null pointer, is guaranteed to compare unequal to a pointer to any object or function.
>
> ISO C specification §6.3.2.3

Beispiel: null-Pointer als Zahl

```
int *px = (void*) 0; /* null Pointer */
```

Beispiel: null-Pointer über NULL Macro

```
int *px = NULL; /* null Pointer mit NULL Macro */
```

Damit man nicht ständig `(void*) 0` schreiben muss, liefert C ein Präprozessormakro `NULL`, das genau durch diesen Ausdruck ersetzt wird.

2.6 Adresse von Objekten [28]

- Die *Adresse* eines Datenobjekts mit dem Typ `typ`, z. B. `int x`
  - kann über `&x` geholt werden
  - hat den Datentyp `type*`, z. B. `int*`
  - ist 4 Byte (32 Bit-Plattform) oder 8 Byte (64 Bit-Plattform) groß
  - kann selbst wieder über einen Pointer referenziert werden `type**`, z. B. `int**`
- Die *Größe* eines Datenobjekts mit dem Typ `typ`, z. B. `int x`
  - kann über `sizeof(typ)` oder `sizeof(x)` bestimmt werden
  - hat den Datentyp `size_t` (nicht `int`!)
  - wird in Bytes gemessen

2.7 Dynamische Speicherverwaltung [29]

In C muss sich die Entwicklerin selbst um die Verwaltung des Speichers kümmern. Dazu bietet die Sprache in der Standardbibliothek eine Reihe von Funktionen an, um Speicher zu allozieren und wieder freizugeben.

- `void* malloc(size_t size)`
  - alloziert einen Speicherblock mit `size` bytes
  - Speicher wird nicht initialisiert
- `void* calloc(size_t n, size_t elsize)`

  - alloziert Speicher für ein Array mit `n` Elementen der Größe `elsize`
  - initialisiert den Speicher mit `0`
- `void* realloc(void *ptr, size_t size)`
  - vergrößert den Speicherblock, auf den `ptr` zeigt auf die Größe `size`
  - gibt einen Pointer zurück (kann andere Adresse sein als `ptr`)
  - Kopiert den Inhalt des Blocks, auf den `ptr` zeigt um
- `void free(void *ptr);`
  - gibt den Speicher frei, auf den `ptr` zeigt
  - Speicher muss mit einer der `alloc`-Funktionen alloziert worden sein
  - darf nur genau ein mal pro `ptr` aufgerufen werden
  - darf mit `NULL` aufgerufen werden

C ist eine Programmiersprache, die keine Fehler verzeiht und keinerlei Sicherheitsnetz bietet. Im Gegenzug läuft das Programm mit maximaler Performance, weil keine komplexen Laufzeitprüfungen stattfinden.

Todsünden im Umgang mit Pointern

- Zuweisung an einen Pointer, der auf kein Objekt zeigt
  ```
  int* p;
  *p = 7; /*schreibt irgendwo in den Speicher */
  ```
- Speicher mit `malloc()` allozieren und nicht wieder freigeben (⇒ *Memory-Leak*)
- Rückgabewert von `malloc()` nicht auf `NULL` prüfen
- Vor oder hinter den allozierten Speicher greifen
- Speicher mehr als einmal mit `free()` freigeben
- Zugriff auf Speicher, nachdem er mit `free()` freigegeben wurde
- Pointer auf Stack-Speicher aus Funktion herausgeben
  ```
  int a[] = { 1, 2, 3 };
  return a;
  ```

Jedes dieser Probleme kann schwerwiegende Sicherheitslücken aufreißen oder das Programm sporadisch zum Absturz bringen. Fehler, die durch das Memory-Management entstehen sind schwer zu finden und können lange unbemerkt bleiben.

- Memory-Leaks verbrauchen langsam den gesamten verfügbaren Speicher, bis das Programm abstürzt. Es gibt C-Programme, die lange Zeit laufen und dann plötzlich wegen Speichermangel crashen. Insbesondere für langlaufende Server-Prozesse ist dies ein großes Problem. Da sich Memory-Leaks nur im laufenden Betrieb und nach einiger Zeit zeigen, sind sie schwer zu finden.

- `malloc()`-Rückgabewert nicht prüfen: Es gibt Entwickler, die glauben, dass ein Aufruf von `malloc()` immer erfolgreich ist („malloc never fails“). Dies muss aber nicht so sein, da der Speicher ausgehen oder der angeforderte Speicherblock zu groß sein könnte. In diesem Fall gibt `malloc()` den Wert `NULL` zurück und das Programm sollte sich im Normalfall sauber beendet. Prüft es den Rückgabewert aber nicht, verwendet es einen Zeiger mit dem Wert `NULL` für seine weiteren Operationen, was zu unvorhersagbaren Problemen führen kann.
- Vor- oder hinter den Speicher greifen: Über `malloc()` allozierter Speicher liegt irgendwo im RAM des Computers. Direkt davor oder dahinter können sich andere Daten befinden oder Verwaltungsstrukturen des Heaps. Es ist ebenso denkbar, dass der Speicher überhaupt nicht beim Betriebssystem angefordert wurde und ein *Segmentation Fault* ausgelöst wird. In jedem Fall kann man viele Probleme provozieren, wenn man auf Adressen zugreift, die einem nicht gehören. Von Abstürzen bis ernsthaften Sicherheitsmängeln ist alles denkbar.
- Speicher mehrmals freigeben: Wenn Speicher mit `free()` freigegeben wird, dann werden entsprechenden Verwaltungsinformationen im Heap aktualisiert. Gibt man den Speicher dann erneut frei, ist vollkommen undefiniert, was dann passiert. Absturz, Sicherheitsloch… lassen Sie sich überraschen.
- Zugriff nach Freigabe: Nachdem der Speicher mit `free()` freigegeben wurde kann er an das Betriebssystem zurückgegeben worden sein, erneut vergeben worden sein oder immer noch frei. Benutzen darf man ihn auf jeden Fall nicht mehr.
- Pointer auf Stack-Speicher aus Funktion herausgeben: Daten auf dem Stack werden nach dem Zurückkehren der Funktion automatisch freigegeben. Tatsächlich werden die Daten aber aus Performance-Gründen nicht überschrieben, sondern stehen weiterhin im Hauptspeicher. Deswegen kann es sein, dass ein Pointer auf den Stack einer bereits beendeten Funktion noch eine Weile sinnvolle Daten liefert, und zwar so lange, bis dieser Stackspeicher von einem anderen Funktionsaufruf überschrieben wurde. Definiert ist das Verhalten hier aber nicht.

Für den letzten Fall hier ein Beispiel, mit clang 7 compiliert. Die Ausgabe hängt davon ab, wie der Compiler das Stacklayout durchführt.

```
#include <stdio.h>

void secret() {
    char secret[6] = { 'P', 's', 's', 't', '!', '\0' };
    printf("%p\n", secret);
}

char* no_secret() {
    long l = 0;
    return (char*) &l;
}

int main() {
    char* s = no_secret();
    printf("%p\n", s);
```

```
    secret();
    printf("%s\n", s);
}
```

Ausgabe

```
0x7ffe463aaa78
0x7ffe463aaa7a
pPsst!
```

Kapitel 3

Komplexe Datenstrukturen

3.1 Übersicht [34]

C ist keine objektorientierte Programmiersprache, sondern rein prozedural. Deswegen kann man in C auch keine Objekte im Sinne von Java verwarten.

- C ist nicht objektorientiert ⇒ *keine* Klassen
- Drei Möglichkeiten, höhere Datenstrukturen zu definieren
  - *Arrays*: Sammlung von gleichartigen Werten
    (→ Java Array)
  - *Structs*: Sammlung von Variablen unterschiedlichen Typs
    (→ Java Klasse ohne Methoden)
  - *Unions*: Mehrere Variablen, aber nur *ein* Wert zu einer Zeit
    (nichts Vergleichbares in Java)

3.2 Arrays [35]

Der einfachste, komplexe Datentyp in C ist das *Array*. Arrays in C sehen denen in Java sehr ähnlich, es gibt aber einige subtile Unterschiede, auf die man als Java-Programmierer schnell hereinfallen kann.

- Deklaration über Typ und Anzahl der Elemente
  z. B. `int werte[100]`
- Zugriff mit `[x]`
  - Indices gehen von 0 – N-1
  - Keine Überprüfung der Grenzen
- Werden im Speicher zusammenhängend abgelegt (= Java)
- C weiß nicht, wie lang ein Array ist (↔ Java)

- Nur im deklarierenden Block kann man mit `sizeof(a) / sizeof(a[0])` die Größe bestimmen
- Programmierer muss die Länge speichern
- `int x[10]; x[11] = 42;` → subtile Fehler (Speicher-Überschreiber)

Die Deklaration von Arrays und der Zugriff auf die Elemente entspricht weitgehend dem Vorgehen in Java.

```
int i;
int x[3];
x[0] = 1;
x[1] = 2;
x[2] = 3;

for (i = 0; i < 3; i++) {
    printf("%d ", x[i]); /* -> 1 2 3 */
}
```

Man kann, wie in Java, das Array direkt bei der Deklaration mit deiner Liste { . . . } initialisieren. Tut man dies, darf man die Länge weglassen, die sich der Compiler dann selbst aus der Liste ermittelt.

```
int i;
int x[] = { 1, 2, 3 };
x[2] = 4;

for (i = 0; i < 3; i++) {
    printf("%d ", x[i]); /* -> 1 2 4 */
}
```

Allerdings überprüft der C-Compiler nicht, ob der Zugriff überhaupt innerhalb der Array-Grenzen liegt:

```
int x[] = { 1, 2, 3 };
printf("%d ", x[4]); /* undefiniertes Ergebnis, was auf immer im Speicher liegt */
```

Deswegen muss man als C-Programmierer immer die Länge des Arrays an Funktionen, die man aufruft mitgeben. Deswegen hat die `main`-Funktion auch die Signatur `int main(int, char**)`, da man andernfalls die Länge der Argumente nicht kennen würde.

- Bei der Übergabe an eine Funktion, ist die Größe nicht mehr bekannt
- Größe muss zusätzlich übergeben werden (sehr häufige Fehlerquelle)

```c
#include <stdio.h>

void listElements(int a[], int len) {
    int i;
    printf("size in function: %ld\n", sizeof(a) / sizeof(int)); /* -> 2 */
    for (i = 0; i < len; i++) {
        printf("%d\n", a[i]);
   }
}

int main() {
    int a[] = { 1, 2, 3, 4, 5 };
    printf("size in main: %ld\n", sizeof(a) / sizeof(int)); /* -> 5 */
    listElements(a, 5);
}
```

Man sieht in dem Beispiel deutlich, dass in der Funktion `listElements` das Array `a` nur noch als ein Zeiger vom Typ `int*` mit 8 Byte länge vorliegt, sodass `sizeof(a) / sizeof(int)` 2 ergibt. Die Funktion kann die Länge des Arrays nicht mehr bestimmen und muss sie deshalb als Parameter `len` übergeben bekommen.

C betrachtet Arrays einfach nur als einen zusammenhängenden Speicherblock. Der Compiler beschafft ausreichend Speicher, um die deklarierten Elemente abzulegen. Bei einem Array `T[n]` vom Typ `T` nach der Formel `sizeof(T) * n`.

Die Array-Variable ist dann – aus Sicht des Compilers – einfach nur ein Zeiger vom Typ `T*` auf das erste Element des Arrays.

- Arrays werden als *Zeiger auf das erste Element* verwaltet
  `a` ist dasselbe wie `&a[0]`
- Einen Array-Parameter einer Funktion kann man als Array (`int a[]`) oder Pointer (`int* a`) deklarieren
- Man kann Arrays auch per Pointer-Arithmetik behandeln

```c
int a[] = { 1, 2, 3, 4, 5 };
int *p = &a[0]; /* Pointer auf erstes Element */
int *e; /* Pointer auf aktuelles Element */

for (e = p; e < p + 5; e++) {
    printf("%d\n", *e);
}
```

Der Code des Beispiels ist identisch mit:

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

for (i = 0; i < 5; i++) {
    printf("%d\n", a[i]);
}
```

Aufgrund des Pointer-Characters eines Arrays, sind folgende Konstrukte identisch:

- `&a[0]` ⇔ `a`
- `a[0]` ⇔ `*a`
- `a[i]` ⇔ `*(a + i)`

3.3 Dynamische Arrays [38]

Die Größe eines Arrays muss bei der Deklaration (z. B. `int x[10]`) durch eine Konstante bestimmt sein, da der Compiler bereits den Speicher für das Array reservieren muss. D. h. der Ausdruck `SIZE` in `T v[SIZE]` muss eine Konstante zur Compilezeit sein. Kann man die Größe nicht durch eine Konstante ausdrücken, bleibt nur das Array mithilfe von `malloc()` und `free()` dynamisch zu erzeugen und zu verwalten.

- Die Größe eines Arrays für Deklarationen der Art `int a[10]` müssen zur Compilezeit bekannt sein
- Dynamische Arrays müssen mit `malloc` erzeugt werden

```
int *a, size = 4;

a = (int*) malloc(sizeof(int) * size); /* Speicher für Array holen */

/* Elemente zuweisen */
a[0] = 1;
a[1] = 2;
*(a + 2) = 3;
*(a + 3) = 4;

/* Array benutzen */

free(a); /* Speicher freigeben */
```

Das vollständige Programm sieht wie folgt aus:

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

int main() {
    int *a, size = 4;

    a = (int*) malloc(sizeof(int) * size); /* Speicher für Array holen */

    /* Elemente zuweisen */
    a[0] = 1;
    a[1] = 2;
    *(a + 2) = 3;
    *(a + 3) = 4;

    free(a); /* Speicher freigeben */
}
```

3.4 Strukturen [39]

Mit Arrays kann ich nur Daten eines Typs speichern und über einen Index darauf zugreifen. Wenn es darum geht, verschiedene Daten in einer strukturierten Form abzulegen oder aber über einen Namen zu adressieren, bieten sich in C der Datentyp `struct` an.

- *Strukturen* (*structs*) sind ähnlich zu Java Objekten (nur ohne Methoden)
- Jeder andere Typ kann Komponente einer Struktur sein
- Zugriff mit `struct.field`
- Werden auf dem Stack angelegt (↔ Java-Klassen: Heap)

```c
struct { int x; int y; float w; } rect;

rect.x = 10;
rect.y = 20;
rect.w = 2.5;
```

Strukturen, die wie im Beispiel oben, deklariert wurde, werden – anders als in Java – auf dem Stack abgelegt und sind somit nur in der aktuellen Funktion benutzbar. Will man die Struktur auf dem Heap ablegen, muss man sie dynamisch erzeugen (siehe unten). Der Ausdruck `struct { ... } NAME;` alloziert bereits den Speicher auf dem Stack, ist also nicht nur eine Deklaration, sondern auch direkt eine Definition der Variable `NAME`.

Wenn man von Java kommt, kann man sich Strukturen wie Java-Klassen vorstellen, bei denen alle Attribute `public` sind und keine Methoden existieren.

```
// Dies ist nur eine Deklaration!
class Rect {
    int x;
    int y;
    float w;
}

class Main {
    public static void main(String args[]) {
      // Hier wird das Objekt erst angelegt.
      Rect rect = new Rect();

      rect.x = 10;
      rect.y = 20;
      rect.w = 2.5f;
    }
}
```

Die syntaktische Besonderheit, dass bei einer Struktur in C die Deklaration und Definition direkt zusammenfallen passt nicht zu modernen Programmieransätzen.

Deswegen kann man eine Struktur in C deklarieren und dann an späteren Stellen wieder referenzieren, ohne direkt eine Variable anzulegen. Dies erfolgt mit der Syntax `struct NAME {...};`. Bei der Variablendeklaration muss man allerdings das `struct` wiederholen. Einen Ausweg schafft `typedef`.

Will man eine Struktur-Definition wiederverwenden

- Struktur benennen → `struct` muss in der Variablendeklaration wiederholt werden
- `typedef` verwenden → `struct` muss nicht wiederholt werden

```
struct Complex { double real; double imag; };
struct Point { double x; double y; } corner;
struct Point p;
p.x = 7.0; corner.x = 9.0;
```

```
typedef struct { double real; double imag; } Complex;
typedef struct { double x; double y; } Point;
Point p;
Complex z;
p.x = 7.0; z.real = 9.8;
```

Die erste Variante ist nicht besonders modern und man sollte heutzutage grundsätzlich auf ein `typedef` zurückgreifen. Beachten Sie, dass beim `typedef` der Name der Struktur *hinten* steht, bei der Variante ohne `typedef` aber *vorne*.

Für die Initialisierung von Strukturen gibt es eine verkürzte Syntax, welche die Initialisierung direkt bei der Definition durchführt.

Initialisierung von Strukturen

```
typedef struct { double x; double y; } Point;

Point p1;
p1.x = 4.2;
p1.y = 2.3;

Point p2 = { 4.2, 2.3 };

Point p3 = { .y = 2.3, .x = 4.2 };

Point p4 = { .x = p3.x, .y = p3.y };
```

Wenn man die Elemente der Struktur bei der Initialisierung benennt, dann ist die Reihenfolge egal und er Code ist robuster gegenüber späteren Erweiterungen der Struktur.

Die Werte bei der Initialisierung der Struktur müssen keine Konstanten sein.

- Strukturen werden häufig *mit Pointern verwendet* (dynamische Erzeugung mit `malloc`)
- Kurzform für das Dereferenzieren des Pointers mit ->

Dereferenzieren einer Struktur

```
(*sp).element = 42;
y = (*sp).element;
```

Verwendung von ->

```
sp->element = 42;
y = sp->element;
```

3.5 Größe einer Struktur [43]

Für die dynamische Speicherverwaltung ist es wichtig zu wissen, wie viel Speicher eine Struktur verbraucht. Eine Struktur ist natürlich mindestens so groß, wie sie Summe der darin benutzten Datentypen. Allerdings kann sie auch mehr Speicher verbrauchen, und zwar dann, wenn der Compiler *Padding* einfügt.

- Die *Größe einer Struktur* ergibt sich aus der Größe der Elemente + Padding für Alignment der Adressen

```
struct {
   char x;
   int y;
   char z;
} s1;

printf("%ld\n", sizeof(s1)); /* -> 12 */

struct {
   char x, z;
   int y;
 } s2;

printf("%ld\n", sizeof(s2)); /* -> 8 */
```

Wie man sieht, verbrauchen die Strukturen unterschiedlich viel Speicher, obwohl sie genau dieselben Daten tragen. Der Grund ist das Padding, das der Compiler eingefügt hat, um die Adressen der Objekte zu *alignen* (auszurichten). Damit ist gemeint, dass die Adressen ganzzahlige Vielfache von einer Konstante (normalerweise 2, 4 oder 8) sind. Das *Alignment* beschleunigt den Zugriff auf die Daten durch den Prozessor, weil dieser nur ausgerichtete Adressen mit maximaler Geschwindigkeit lesen kann.

Im Beispiel scheint der Compiler ein Alignment auf Adressen durchzuführen, die durch vier teilbar sind. Damit sieht die erste Struktur (aus Sicht des Compilers) wie folgte aus:

```
struct {
   char x;         /* Offset: 0 */
   char _padding[3]; /* Offset: 1 */
   int y;          /* Offset: 4 */
   char z;         /* Offset: 8 */
   char _padding[3]; /* Offset: 9 */
} s1;
```

Das Padding am Ende der Struktur dient dazu, dass die Gesamtgröße der Struktur ebenfalls ein Vielfaches des Alignments ist. Ohne das Padding wäre die Struktur 9 Bytes groß, sodass sie auf 12 Bytes aufgefüllt wird, damit ihre Größe wieder durch vier teilbar wird.

Bei der zweiten Struktur ist weniger Padding erforderlich.

```
struct {
   char x;         /* Offset: 0 */
   char z;         /* Offset: 1 */
   char _padding[2]; /* Offset: 2 */
   int y;          /* Offset: 4 */
```

```
} s2;
```

3.6 Struktur dynamisch anlegen [44]

Ebenso wie Arrays möchte man Strukturen dynamisch verwalten können. Dies erfolgt dann analog mit `malloc()` und `free()`.

```
typedef struct { int x; int y; } Point2D;

/* Speicher allozieren */
Point2D *p = (Point2D*) malloc(sizeof(Point2D));

p->x = 12;
p->y = 23;

printf("x=%d, y=%d\n", p->x, p->y); /* x=12, y=23 */

/* Speicher freigeben */
free(p);
```

Die Verwendung des ->-Operators erspart einem beim Umgang mit Pointer auf Strukturen das ständige dereferenzieren mit *.

3.7 Unions [45]

Ein absoluter Exot unter den Datentypen ist die Union, die man aus Java und anderen Sprachen nicht kennt. Laut den C-Erfindern benutzt man sie dann, wenn man eine Variable benötigt, die zu unterschiedlichen Zeiten unterschiedliche Typen aufnehmen soll aber immer dieselbe Größe haben soll.

- *Unions* sind ähnlich zu Strukturen, speichern aber immer nur einen Wert
- Die Größe entspricht dem größten Datentyp

```
union u_tag {
    int ival;
    float fval;
    char *sval;
} u;
```

```
printf("sizeof=%ld\n", sizeof(u)); /* sizeof=8 */

u.ival = 12;
printf("u.ival=%d\n", u.ival); /* u.ival=12 */

u.fval = 8.0;
printf("u.fval=%f\n", u.fval); /* u.fval=8.0 */
printf("u.ival=%d\n", u.ival); /* u.ival=1090519040 */
```

Die Größe der Union im Beispiel ergibt sich aus dem größten Datentyp, der in diesem Fall `char*` ist, weil ein Pointer auf einer 64-Bit-Plattform 8 Byte benötigt.

Die letzte Zeile im Beispiel zeigt, das man wissen muss, welche Daten man in die Union geschrieben hat, da ein Zugriff über den falschen Typ zu seltsamen Ergebnissen führen kann. Das Ergebnis ergibt sich aus dem Bitmuster, die der `float`-Wert `8.0` hat, wenn man es als Integer interpretiert.

3.8 Bitfelder [46]

Mit Bitfeldern kann man in C Variablen definieren, die eine bestimmte Anzahl von Bits haben. Die einzelnen Bits können benannt werden.

- Ein *Bitfeld* (*bitfield*) ist eine Integer-Variable mit einer bestimmten Anzahl von Bits
  Syntax: `TYP [NAME] : BREITE`
- Bits können über Namen angesprochen werden
- Der Compiler packt die Daten aufeinanderfolgender Bitfelder eng zusammen

```
struct Date {
    unsigned int day :  5;
    unsigned int month : 4;
    signed int  year  : 22;
    char        isDST : 1;
};
```

Dieses Beispiel zeigte die Verwendung eines 32 Bit breiten Bitfeldes, um das aktuelle Datum in einem einzigen Integer zu speichern.

```
#include <stdio.h>

typedef struct {
    unsigned int day :  5;
```

```
    unsigned int month : 4;
    signed int year  : 22;
    char isDST       :  1;
} Date;

int main() {
    Date myDate = { 24, 12, 2017, 0 };
    printf("%ld\n", sizeof(myDate)); /* -> 4 */

    printf("%d-%d-%d\n", myDate.year, myDate.month, myDate.day);
    /* -> 2017-12-24 */
}
```

3.9 Bitmasken [48]

Bitfelder vereinfachen den Zugriff auf die einzelnen Bits eines Wertes und werden z. B. eingesetzt, um Protokolle zu implementieren. Eine Alternative dazu ist, die Bits selbst zu setzen und zu verwalten.

Alternativ zu Bitfeldern kann man die Daten auch selbst packen und entpacken

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

#define DAY_SHIFT 27
#define MONTH_SHIFT 23
#define YEAR_SHIFT 1
#define DAY_MASK 0x1f
#define MONTH_MASK 0x0f
#define YEAR_MASK 0x3fffff
#define DST_MASK 0x01

uint32_t encode(int day, int month, int year) {
    return (((day & DAY_MASK) << DAY_SHIFT)
         | ((month & MONTH_MASK) << MONTH_SHIFT)
         | ((year & YEAR_MASK) << YEAR_SHIFT));
}
```

```
void decode(uint32_t date, int *day, int *month, int *year) {
    *day = (date >> DAY_SHIFT) & DAY_MASK;
    *month = (date >> MONTH_SHIFT) & MONTH_MASK;
    *year  = (date >> YEAR_SHIFT) & YEAR_MASK;
}
```

```c
int main() {
    uint32_t myDate;
    int day, month, year;

    myDate = encode(24, 12, 2017);
    printf("%u\n", myDate); /* 3321892802 */

    myDate = 763367326;
    decode(myDate, &day, &month, &year);
    printf("%d-%d-%d\n", year, month, day); /* 1999-11-5 */

}
```

Kapitel 4

Strings

4.1 Zeichen [51]

Im Gegensatz zu anderen Programmiersprachen kennt C keinen Datentyp zur Darstellung von *Zeichenketten* (*Strings*), sondern bildet diese einfach als ein Array von Zeichen ab. Damit ist der einzige von C zur Verfügung gestellte Datentyp, um Zeichenketten zu bilden, das einzelne Zeichen: *char*.

- Der Datentyp `char` hat 8 Bit und kann so nur ASCII-Zeichen darstellen
- Für Unicode gibt es spezielle Datentypen (`wchar_t` aus `wchar.h`)
- `ctype.h` bietet Funktionen, um Zeichen auf ihre Art zu prüfen

Funktion	Test	Zeichen
`isalnum(ch)`	alphanumerisch	[a-zA-Z0-9]
`isalpha(ch)`	Buchstabe	[a-zA-Z]
`isdigit(ch)`	Ziffer	[0-9]
`ispunct(ch)`	Satzzeichen	[~!@#%^&…]
`isspace(ch)`	Whitespace	[\t\n]
`isupper(ch)`	Großbuchstabe	[A-Z]
`islower(ch)`	Kleinbuchstabe	[a-z]

Die Bitbreite des Datentyps `char` ist fest in der C-Spezifikation mit 8 Bit verankert und kann nicht geändert werden. Deswegen muss man bei der Verwendung von Unicode auf andere Datentypen ausweichen.

Zeichenliterale repräsentieren ein einziges Zeichen, umschlossen von einfachen Anführungszeichen `'`

Bestimmte Sonderzeichen müssen *escaped*, d. h. speziell notiert, werden

Escape-Sequenz	Bedeutung
`\'`	Anführungszeichen '
`\"`	Anführungszeichen "
`\\`	Backslash \
`\f`	Seitenvorschub
`\t`	Tabulator
`\n`	Zeilenvorschub *(newline)*
`\r`	Wagenrücklauf *(carriage return)*
`\b`	Backspace
`\f`	Seitenvorschub *(form feed)*

Beispiel:

```
char a = 'a';
char b = 'b';
char tab = '\t';
char newline = '\n';

printf("%c%c%c%c", a, tab, b, newline); /* a b */
```

4.2 Strings [53]

C-Strings sind eine ausgesprochene Enttäuschung, wenn man andere Programmiersprachen gewöhnt ist. Sie sind hochgradig speichereffizient erfordern im Gegenzug aber viel Arbeit und Sorgfalt vom Programmierer.

- In Java sind Strings Objekte mit Methoden etc.
- In C gibt es keinen Datentyp für Strings
- Strings sind nur ein Array von `char`, das durch ein `NUL` (`'\0'`) beendet wird
- Ein *String-Literal* (z. B. `"pr3 rocks"`)
  - alloziert automatisch Speicher, inklusive Platz für das `'\0'`-Zeichen
  - hat als Wert die Adresse des ersten Zeichens (Pointer)
  - kann nicht verändert werden (beliebter Fehler)
- Für alle anderen Strings, die keine Literale sind, muss vom Programm Speicher alloziert werden

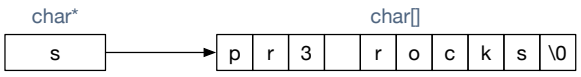
Beachten Sie, dass `NUL` nicht dasselbe wie `NULL` ist. `NUL` bezeichnet das Zeichenliteral `'\0'`, `NULL` hingegen den `void*`-Pointer `(void*) 0`.

An einer Stelle haben die C-Entwickler Gnade gezeigt und ein Literal für Strings in C spezifiziert. D. h. man kann Strings im Programm direkt angeben (`"pr3 rocks"`) und muss sie nicht als `char[]`-Literal (`{ 'p', 'r', '3', '', 'r', 'o', 'c', 'k', 's', '\0'}` schreiben.

```
char s[] = "pr3 rocks";

printf("%ld\n", sizeof(s)); /* -> 10 */

s[3] = '2'; /* Pfui, Fehler. Ist ein Literal!!! */
```



Bei der Deklaration eines solchen Literals passieren drei Dinge:

- Es wird ein `char`-Array mit dem Platz für die angegebenen Zeichen + 1 Byte für das `NUL` am Ende alloziert.
- Es wird ein `char*`-Pointer alloziert.
- Dem Pointer wird die Adresse des Arrays zugewiesen.

Eine Definition wie `char s[] = "a"` benötigt deshalb auf einer 64-Bit-Plattform 10 Byte: 8 Byte für den Pointer `s` und zwei Byte für die Zeichen `{'a', '\0'}`.

4.3 Pointer auf Strings [55]

Da C-Strings Arrays sind und Arrays in C als Pointer auf das erste Element aufgefasst werden können, kann man C-Strings ebenfalls als Pointer auf das erste Zeichen verstehen.

- Strings werden einfach über einen Pointer auf das erste Zeichen verwaltet
  - man kann sie wie Arrays behandeln
    `char s[] = "xyz";`
  - man kann sie wie `char*`-Pointer behandeln
    `char* s = "xyz";`
- Länge ergibt sich nur über das `'\0'` am Ende

Pointer-Style

```
char* s = "pr3 rocks";
char* p;

for (p = s; *p; p++) {
```

```
    printf("%c", *p);
}
```

Array-Style

```
char s[] = "pr3 rocks";
int i;

for (i = 0; s[i] != '\0'; i++) {
    printf("%c", s[i]);
}
```

Das Konstrukt `*p` in der `while`-Schleife mag auf den ersten Blick erstaunlich erscheinen, es funktioniert aber, weil in C das Ende eines Strings mit einem Null-Byte (`0x00`) angezeigt wird und `0` grundsätzlich `false` ist.

4.4 Strings kopieren [57]

Will man in C einen String kopieren, kann man dies nicht einfach durch eine Zuweisung machen. Denn bei einer Zuweisung würden die Pointer kopiert und nicht der Inhalt. Dieses Verhaltens entspricht dem von Java, nur dass dies dort nicht auffällt, weil Strings unveränderlich sind und sich deshalb nicht erkennen lässt, dass beide Variablen auf dasselbe Objekt zeigen.

- Zuweisung `s = t`
  - kopiert den Pointer, nicht den Inhalt (→ Java)
  - zwei Pointer zeigen auf denselben String (→ Java)
- Kopieren von Strings mit `strcpy(t, s)`
  - Speicher für Ziel-String muss vorher angelegt seine
  - Speicher muss groß genug sein (_Vorsicht!_)
- Kopieren von Strings mit `strdup(s)`
  - Legt den Speicher selbständig an
  - Gibt Pointer auf den neuen String zurück
  - Speicher muss mit `free()` freigegeben werden

```
char s[] = "pr3 rocks";
char* t;

/* Pointer wird kopiert */
```

```
t = s;
printf("t=%p\n", t); /* t=0x7fff5fa4179e */
printf("s=%p\n", s); /* s=0x7fff5fa4179e */

/* Inhalt wird kopiert */
t = strdup(s);
printf("t=%p\n", t); /* t=0x7f7f524027d0 */
printf("s=%p\n", s); /* s=0x7fff5fa4179e */

strcpy(t, "tpe rocks");
printf("t=%p\n", t); /* t=0x7f7f524027d0 */
printf("%s\n", t); /* tpe rocks */

free(t); /* Speicher wieder freigeben */
```

Das Beispiel verwendet zwar die Funktion `strcpy`, diese sollte man aber in der Realität nicht einsetzen, weil sie keine Überprüfung der Länge durchführt. Beim Kopieren eines Strings in einen Buffer, sollte immer die Funktion `strncopy` eingesetzt werden, der man zusätzlich noch die Länge des Puffers mitgeben kann.

```
#define BUFFER_SIZE 20
char buffer[BUFFER_SIZE];
char s[] = "pr3 rocks";

strncpy(buffer, s, BUFFER_SIZE);

/* Wenn der string genau BUFFER_SIZE lang oder länger ist, schreibt
   strncpy kein NUL ans Ende. Deswegen setzen wir dies manuell,
   sodass der String auf jeden Fall terminiert ist */
buffer[BUFFER_SIZE - 1] = '\0';
```

4.5 String-Funktionen [59]

C lässt einen nicht ganz alleine, sondern bietet für den Umgang mit C-Strings eine Reihe von Funktionen an, die die wichtigsten Aufgaben im Umgang mit Strings lösen.

`string.h` enthält eine Reihe von Stringfunktionen

- `#include <string.h>`
- Strings müssen *NUL-terminiert* sein
- alle Zielarrays müssen groß genug sein → *keine Prüfung*

Einige gängige Funktionen sind

- `char *strcpy(char *dest, char *source)`
  Kopiert `source` nach `dest`
- `char *strncpy(char *dest, char *source, int num)`
  Kopiert `source` nach `dest` aber maximal `num` Zeichen
- `size_t strlen(const char *source)`
  Länge des Strings (ohne NUL)
- `char *strchr(const char *source, const char ch)`
  Pointer auf erstes Auftreten von `ch` in `source`
- `char *strstr(const char *source, const char *search)`
  Pointer auf erstes Auftreten von `search` in `source`

Beispiel für die Funktionen:

```
char s[] = "pr3 ist super!";

printf("Länge: %lu\n", strlen(s)); /* Länge: 14 */

char* zahl = strchr(s, '3');
printf("Index '3': %ld\n", zahl - s); /* Index '3': 2 */
printf("Reststring: %s\n", zahl); /* Reststring: 3 ist super! */

char* super = strstr(s, "super");
printf("Index: %ld\n", super - s); /* Index: 8 */
printf("Reststring: %s\n", super); /* Reststring: super! */
```

4.6 String-Formatierung [61]

Umwandlung von Strings ↔ Daten mit

- `int sscanf(char *string, char *format, ...)`
  - liest den Inhalt des Strings entsprechend `format`
  - schreibt die Ergebnisse in das 3., 4., 5. etc. Argument
  - gibt die Anzahl der erfolgreichen Umwandlungen zurück
- `int sprintf(char *buffer, char *format, ...)`
  - erzeugt einen String entsprechend `format`
  - formatiert 3., 4., 5. etc. Argument
  - schreibt den String in den Puffer (Größe!)
  - gibt die Anzahl der erfolgreichen Umwandlungen zurück

Auch `sprintf` sollte heute nicht mehr verwendet werden, sondern `snprintf`, das eine Längenprüfung zulässt.

Es gibt neben den sehr vielseitigen `sscanf` und `sprintf`-Funktionen noch einfachere Umwandlungen in Zahlen mit den `atoX`-Funktionen:

- `int atoi(const char *nptr);`
- `long atol(const char *nptr);`
- `long long atoll(const char *nptr);`
- `double atof(const char *nptr);`

Die Funktionsweise dürfte sich aus den Signaturen ergeben.

Codes für den Format-String von `sscanf` (Auswahl)

Code	Bedeutung	Datentyp
%c	einzelnes Zeichen	char
%d	Ganzzahl	int
%f	Fließkommazahl	float
%s	String	char*
%[^c]	alles bis um nächsten Zeichen c	char*

Beispiel: sscanf

```
char* message = "Hallo Freunde";
char* zahlen = "1 2 3 4";
char s[10], t[10];
int a, b, c, d;

sscanf(message, "%s %s", s, t);
printf("s=%s\n", s); /* Hallo */
printf("t=%s\n", t); /* Freunde */

sscanf(zahlen, "%d %d %d %d", &a, &b, &c, &d);
printf("%d-%d-%d-%d\n", a, b, c, d); /* 1-2-3-4 */
```

Codes für `sprintf`

- Codes für den Format-String von `sprintf` (Auswahl)
- Syntax: `%[width][.precision][length]type`

Code	Bedeutung	Datentyp
%nc	Zeichen mit n Leerzeichen	char
%nd	Integer mit n Leerzeichen	int
%nld	Long mit n Leerzeichen	long
%n.mf	Fließkommazahl mit n, m	float, double
%n.ms	m Zeichen eines Strings der Breite n	char*
%p	Pointer-Adresse	void*

Beispiel sprintf

```
char s[] = "Text1";
char t[] = "Text2";
char buffer[255];

sprintf(buffer, "%10s %-10s %s", s, t, "Huhu");
printf("%s\n", buffer);

sprintf(buffer, "%10.2f", 21.12345678);
printf("%s\n", buffer);
```

Ausgabe

```
     Text1 Text2       Huhu
     21.12
```

POSIX-Erweiterung: *Parameter-Feld*

- Syntax: `%n$[width][.precision][length]type`
- Adressiert den Parameter mit dem Index `n`, beginnend bei 1
- Unter Windows `printf_p`-Funktion

```
printf("%2$d %1$d %2$d %1$d", 1, 2);
```

Ausgabe

```
2 1 2 1
```

Anzahl der geschriebenen Zeichen

- Syntax: `%n`
- Schreibt die Anzahl der bisher ausgegebenen Zeichen in die Variable

```
int count;
printf("012345678%n", &count);
printf(" -> %d", count);
```

Ausgabe

```
012345678 -> 9
```

Achtung: Öffnet das Tor für diverse Angriffe

Die Möglichkeit, durch das %n-Formatzeichen eine Schreiboperation auszulösen, eröffnet die Möglichkeit über Fehler im Formatstring erhebliche Sicherheitslücken aufzureißen. Außerdem macht es den Format-String von `printf` zu einer vollständigen Programmiersprache (turing-vollständig).

Der Gewinner des International Obfuscated C Code Contest 2020 hat ein Tic-Tac-Toe nur als Formatstring unter Verwendung von %n implementiert.

Gewinner des International Obfuscated C Code Contest 2020

```
#include <stdio.h>

#define N(a)     "%"#a"$hhn"
#define O(a,b)   "%10$"#a"d"N(b)
#define U        "%10$.*37$d"
#define G(a)     "%"#a"$s"
#define H(a,b)   G(a)G(b)
#define T(a)     a a
#define s(a)     T(a)T(a)
#define A(a)     s(a)T(a)a
#define n(a)     A(a)a
#define D(a)     n(a)A(a)
#define C(a)     D(a)a
#define R        C(C(N(12)G(12)))
#define o(a,b,c) C(H(a,a))D(G(a))C(H(b,b)G(b))n(G(b))O(32,c)R
#define SS       O(78,55)R "\n\033[2J\n%26$s";
#define E(a,b,c,d) H(a,b)G(c)O(253,11)R G(11)O(255,11)R H(11,d)N(d)O(253,35)R
#define S(a,b)   O(254,11)H(a,b)N(68)R G(68)O(255,68)N(12)H(12,68)G(67)N(67)

char* fmt = O(10,39)N(40)N(41)N(42)N(43)N(66)N(69)N(24)O(22,65)O(5,70)O(8,44)N(
          45)N(46)N   (47)N(48)N(   49)N( 50)N(    51)N(52)N(53   )O( 28,
          54)O(5,       55) O(2,   56)O(3,57)O(    4,58 )O(13,   73)O(4,
          71 )N(  72)O   (20,59   )N(60)N(61)N(     62)N (63)N   (64)R R
          E(1,2,  3,13   )E(4,    5,6,13)E(7,8,9      ,13)E(1,4   ,7,13)E
          (2,5,8,       13)E(    3,6,9,13)E(1,5,       9,13)E(3   ,5,7,13
          )E(14,15,   16,23)    E(17,18,19,23)E(       20, 21,   22,23)E
          (14,17,20,23)E(15,  18,21,23)E(16,19,  22     ,23)E(   14, 18,
          22,23)E(16,18,20,  23)R U O(255 ,38)R  G (    38)O(   255,36)
          R H(13,23)O(255,   11)R H(11,36) O(254  ,36)    R G(   36 ) O(
          255,36)R S(1,14   )S(2,15)S(3, 16)S(4,  17 )S    (5,    18)S(6,
          19)S(7,20)S(8,   21)S(9    ,22)H(13,23   )H(36,    67    )N(11)R
          G(11)""O(255,   25 )R       s(C(G(11)   ))n (G(         11) )G(
          11)N(54)R C(   "aa")   s(A(   G(25)))T   (G(25))N        (69)R o
          (14,1,26)o(   15, 2,   27)o   (16,3,28   )o( 17,4,       29)o(18
          ,5,30)o(19    ,6,31)o(       20,7,32)o   (21,8,33)o      (22 ,9,
          34)n(C(U)    )N( 68)R H(    36,13)G(23)   N(11)R C(D(     G(11)))
```

```
          D(G(11))G(68)N(68)R G(68)O(49,35)R H(13,23)G(67)N(11)R C(H(11,11)G(
          11))A(G(11))C(H(36,36)G(36))s(G(36))O(32,58)R C(D(G(36)))A(G(36))SS

#define arg d+6,d+8,d+10,d+12,d+14,d+16,d+18,d+20,d+22,0,d+46,d+52,d+48,d+24,d\
          +26,d+28,d+30,d+32,d+34,d+36,d+38,d+40,d+50,(scanf(d+126,d+4),d+(6\
          -2)+18*(1-d[2]%2)+d[4]*2),d,d+66,d+68,d+70, d+78,d+80,d+82,d+90,d+\
          92,d+94,d+97,d+54,d[2],d+2,d+71,d+77,d+83,d+89,d+95,d+72,d+73,d+74\
          ,d+75,d+76,d+84,d+85,d+86,d+87,d+88,d+100,d+101,d+96,d+102,d+99,d+\
          67,d+69,d+79,d+81,d+91,d+93,d+98,d+103,d+58,d+60,d+98,d+126,d+127,\
          d+128,d+129

char d[538] = {1,0,10,0,10};

int main() {
    while(*d) printf(fmt, arg);
}
```

Kapitel 5

Funktionen

5.1 Syntax [69]

Die Syntax für die Deklaration von C-Funktionen ist identisch zu der von Methoden in Java – kein Wunder, da Java sich die Syntax hier einfach bei C abgeschaut hat.

- Syntax ist identisch zur Methodendeklaration in Java

Syntax

```
RETURN_TYPE NAME(TYPE PARAM, TYPE PARAM, ...) {
    RUMPF
}
```

Beispiel

```
int add(int a, int b) {
   return a + b;
}
```

Hat die Funktion keinen Rückgabewert, so ist der Rückgabetyp `void`

Was in C natürlich fehlt ist die Angabe einer Sichtbarkeit mit `public`, `protected` und `private`, wie wir sie aus Java kennen. Mit dem Schlüsselwort `static` (siehe unten) kann man die Sichtbarkeit einer Funktion auf die aktuelle Quelltextdatei beschränken.

5.2 Deklaration vs. Definition [70]

Java kennt keine strenge Unterscheidung zwischen der Deklaration und Definition einer Funktion. In C sind diese beiden Begriffe aber streng auseinanderzuhalten. Eine Deklaration macht die Funktion nur bekannt und kann beliebig oft erfolgen, eine Definition liefert hingegen ihren Funktionsrumpf – also ihre Implementierung – und darf nur einmal in einem Programm vorkommen.

- Eine (Funktions-) *Deklaration* (aka *Prototyp*) macht dem Compiler bekannt
  - den Namen der Funktion
  - den Rückgabetyp
  - die Parameter
- Eine (Funktions-) *Definition* liefert die Implementierung einer Funktion
- Eine Funktion kann
  - *beliebig oft deklariert*
  - nur *einmal definiert* werden

Diese Unterscheidung wurde schon früher in der Vorlesung diskutiert.

Anders als in Java müssen in C die Funktionen vor ihrer Benutzung deklariert sein das heißt der Compiler schaut nicht weiter unten im Quelltext, ob dort noch irgendwo die Funktion vorkommt. Eine Definition liefert auch gleichzeitig eine Deklaration der Funktion.

- Die *Deklaration* muss vor der Benutzung erfolgen
  - ist die Funktion vor der Benutzung definiert, muss sie nicht mehr deklariert werden
  - Deklarationen finden sich meist in `.h`-Dateien
  - Definitionen finden sich meist in `.c`-Dateien

Deklaration

```
int add(int a, int b);
```

Definition

```
int add(int a, int b) {
    return a + b;
}
```

Im folgenden Beispiel wird die `add`-Funktion von `calc()` bereits vor deren Definition verwendet. Deswegen muss eine Deklaration erfolgen. Andernfalls käme es zu einem Compiler-Fehler.

Beispiel: Deklaration vs. Definition

```
/* Deklaration */
int add(int a, int b);

/* Benutzung */
void calc() {
    int result;
    result = add(5, 7);
```

```
}

/* Definition nach der Benutzung */
int add(int a, int b) {
    return a + b;
}
```

Da die Definition einer Funktion auch gleichzeitig deren Deklaration beinhaltet, muss in diesem Beispiel keine Deklaration mehr erfolgen: add ist vor der Benutzung bereits definiert und damit deklariert.

Beispiel: Deklaration vs. Definition

```
/* Definition vor der Benutzung, keine Deklaration nötig */
int add(int a, int b) {
    return a + b;
}

/* Benutzung */
void calc() {
    int result;
    result = add(5, 7);
}
```

5.3 Aufteilung .c und .h-Datei [74]

Wie bereits diskutiert, ist es in C üblich die Deklaration und Definition auf verschiedene Dateien aufzuteilen. Die Deklarationen findet man üblicherweise in den .h-Dateien (*Header-Files*) die Definitionen in den dazugehörigen .c-Dateien.

Wenn eine Funktion nur innerhalb einer Quelltextdatei benötigt wird und diese auch nicht an andere Teile des Programms exportiert werden soll, nimmt man sie nicht in die Header-Datei auf.

- Deklarationen finden sich in .h-Dateien, Definitionen in .c-Dateien
- Eine .c-Datei sollte ihre korrespondierende .h-Datei selbst inkludieren (verhindert Abweichungen Definition ↔ Deklaration)

greeter.h

```
#ifndef GREETER_H
#define GREETER_H
/*
 * Enum für die verschiedenen Tageszeiten.
 */
```

```c
typedef enum { MORGEN, ABEND } TagesZeit;

/*
 * Grüßt die als n übergebene Person passend zur Tageszeit z.
 */
void greet(TagesZeit z, char* n);
#endif
```

Die Headerdatei enthält die Deklarationen der Funktion `greet()` und einer von dieser Funktion verwendeten Enumeration `TagesZeit`. Damit stellt sie alle Informationen zur Verfügung, die ein Nutzer der Funktion benötigt.

greeter.c

```c
#include "greeter.h"
#include <stdio.h>

void greet(TagesZeit zeit, char* name) {
    printf("%s %s", zeit == MORGEN ? "Guten Morgen" : "Guten Abend", name);
}
```

user.c

```c
#include "greeter.h"
int main() {
    greet(ABEND, "Thomas");
}
```

In der dazugehörigen `.c`-Datei finden sich die Implementierung der Funktion (ihre Definition). Der Verwender der Funktionalität `user.c` inkludiert die Header-Datei und kennt somit die Deklaration der Funktion `greet()`. Deren Definition ist unwichtig und wird vom Linker später hinzugefügt.

5.4 Pass-by-Value [76]

Beim Aufruf einer Funktion in C werden die Parameter als *Pass-By-Value* übergeben. Damit entspricht das Verhalten von C exakt dem von Java: Alle Werte werden beim Funktionsaufruf kopiert. Möchte man stattdessen die Inhalte der Variablen in der Funktion verändern, also ein *Pass-By-Reference* durchführen, muss man dies mit Pointern simulieren. Java verhält sich hier genauso, nur dass Objekte als Referenzen übergeben werden, die beim Funktionsaufruf kopiert werden.

- Alle Funktionsparameter werden per *Pass-By-Value* übergeben
- Mit Pointern kann man aber jederzeit *Pass-By-Reference* simulieren

Pass-By-Value

```
void swap(int a, int b) {
    int tmp = a;
    a = b;
    b = tmp;
}

int main() {
    int a = 42, b = 23;
    swap(a, b);
    printf("a=%d, b=%d", a, b); /* a=42, b=23 */
}
```

Die `swap`-Funktion funktioniert nicht, weil die Integer-Werte `a` und `b` innerhalb der Funktion *Kopien* der Werte von `main` sind.

Will man, dass die Funktion die Werte vertauschen kann, muss man Pointer verwenden.

Pass-By-Value mit Pointer

```
void swap(int* a, int* b) {
    int tmp = *a;
    *a = *b;
    *b = tmp;
}

int main() {
    int a = 42, b = 23;
    swap(&a, &b);
    printf("a=%d, b=%d", a, b); /* a=23, b=42 */
}
```

5.5 static [78]

Das Schlüsselwort `static` ist für Java-Programmierer besonders verwirrend, weil es in C eine völlig andere Bedeutung hat: Während es in Java dafür sorgt, dass Variablen und Methoden an der Klasse hängen und nicht mehr am Objekt, schränkt des in C bei globalen Variablen und Funktionen deren Sichtbarkeit ein.

- Werden *Funktionen* oder *globale Variablen* als `static` gekennzeichnet, dann sind sie außerhalb der Datei nicht sichtbar (→ `protected` in Java)

```
static char gruss[] = "Guten Tag";
static void gruesse() {
```

```
    printf("%s\n", gruss);
}
```

Deklariert man in C eine lokale Variabel als der `static`, dann handelt es sich gar nicht um eine lokale Variable, sondern um eine globale Variable, deren Sichtbarkeit auf diese Funktion beschränkt ist. Wie alle globalen Variablen wird sie nicht auf dem Stack, sondern im Daten-Segment alloziert. Die Initialisierung der Variabel in der Funktion wird nur ein einziges Mal, beim ersten Aufruf durchgeführt.

- Lokale Variablen mit `static` werden nicht auf dem Stack alloziert, sondern im Daten-Segment und werden nur einmal initialisiert

```
#include <stdio.h>

void counter() {
    static int c = 1;
    printf("%d\n", c++);
}

int main() {
    counter(); /* 1 */
    counter(); /* 2 */
    counter(); /* 3 */
}
```

In dem Beispiel sieht man deutlich, dass die Variable `c` über die Funktionsaufrufe hinweg ihren Wert behält. Beim ersten Aufruf von `counter()` wird sie mit dem Wert 1 initialisiert, bei allen weiteren Aufrufen findet Initialisierung aber nicht mehr statt.

5.6 Schlüsselwort const [80]

Ein Schlüsselwort in C, das es in Java überhaupt nicht gibt, ist `const`. In Java hat man darauf verzichtet, weil man es als zu komplex angesehen hat und sich stattdessen für `final` entschieden, das eine andere Semantik als `const` hat. Mit `const` kann man in C kennzeichnen, dass eine Variabel nicht verändert werden darf.

Relativ kompliziert wird die Verwendung von `const`, wenn es sich um Pointer handelt: Das `const` kann sich entweder auf den Pointer beziehen oder aber auf das Objekt auf das der Pointer zeigt oder sogar auf beides.

- Mit `const` kann deklariert werden, dass ein Argument nicht geändert wird
- Bei Funktionen meist nur sinnvoll für Pointer (wg. Pass-by-Value)

- Bei Pointern muss man unterscheiden
  - Pointer auf einen konstanten Wert: Pointer kann geändert werden Wert nicht
    `const int *ptr` oder `int const *ptr`
  - Konstanter Pointer auf einen Wert: Pointer kann nicht geändert werden, Wert jedoch schon
    `int *const ptr`
  - Konstanter Pointer auf einen konstanten Wert: Weder Pointer noch Wert können geändert werden
    `const int *const ptr`

Bei Funktionsparametern ist `const` im Allgemeinen nur bei Pointern sinnvoll, weil die Parameter ohnehin by-value übergeben werden und `const` hier wenig bringt.

Konstanter Wert

```
int i = 10, j = 20;
const int *ptr = &i; /* Pointer auf konstanten Wert */

ptr = &j; /* Ok */
*ptr = 100; /* Fehler */
```

Konstanter Pointer

```
int i = 10, j = 20;
int *const ptr = &i; /* Konstanter Pointer */

ptr = &j; /* Fehler */
*ptr = 100; /* Ok */
```

Konstanter Pointer auf konstanten Wert

```
int i = 10, j = 20;
const int *const ptr = &i; /* Konstanter Pointer */

ptr = &j; /* Fehler */
*ptr = 100; /* Fehler */
```

5.7 Schlüsselwort extern [83]

Bei der Deklaration von Funktionen wird vom Compiler das Schlüsselwort `extern` automatisch hinzugefügt, da aus dem fehlenden Funktionsrumpf klar wird, dass es sich „nur“ um eine Deklaration handelt.

Bei Variablen gibt es keine Möglichkeit, ohne zusätzliches Schlüsselwort, die Deklaration von der Definition zu unterscheiden. Deswegen *muss* hier bei der Deklaration `extern` eingesetzt werden.

- Mit `extern` kann man Variablen deklarieren, die an anderer Stelle (anderer Datei) deklariert werden
- `extern`-Deklaration führt keine Initialisierung durch

file1.c

```
extern char buffer[]; /* kein Speicher reservieren */

int main() {
    printf("%s\n", buffer);
}
```

file2.c

```
char buffer[] = "Hallo Welt!"; /* Speicher reservieren */
```

Eine Variable muss – genauso wie eine Funktion – vor ihrer Benutzung deklariert werden. Wenn eine Variable, die in einer anderen Datei (*Compilationseinheit*) definiert wurde, benutzt werden soll, muss man sie entsprechend deklarieren. Durch das Schlüsselwort `extern` vor der Variable wird angezeigt, dass kein Speicher reserviert werden soll, da dies an anderer Stelle bei der Definition erfolgt.

In diesem Beispiel wird `buffer` in `file1.c` nur deklariert und in `file2.c` dann definiert. Der Linker kümmert sich am Ende darum, dass die `main`-Funktion auf die richtige Variable im Speicher zugreift.

5.8 Funktionspointer [84]

C hat – anders als Java – von Anfang an Funktionen als „first class citizens“ betrachtet, sodass man Funktionen wie jedes andere Datenobjekt auch verwenden kann. Das Mittel dazu sind *Funktionspointer*, d. h. Pointer, die auf Funktionen zeigen. Diese Pointer können wie alle anderen Pointer auch übergeben und zugewiesen werden. Pointer-Arithmetik scheidet aus naheliegenden Gründen aus.

Leider ist die Syntax für die Deklaration von Variablen, die Funktionspointer enthalten können etwas sehr kompliziert ausgefallen, sodass es sogar Webseiten gibt, die die Syntax übersetzen.

Funktionen können über *Funktionspointer* wie Daten übergeben und verwaltet werden

- `int func()`: Funktion, die einen `int` zurückgibt
- `int *func()`: Funktion, die einen Pointer auf einen `int` zurückgibt
- `int (*func)()`: Pointer auf eine Funktion, die einen `int` zurückgibt
- `int *(*func)()`: Pointer auf eine Funktion, die einen Pointer auf einen `int` zurückgibt
- `int *(*func)(char*)`: Pointer auf eine Funktion, die einen Pointer auf einen `int` zurückgibt und einen Pointer auf `char` als Parameter hat

Über den *Aufrufoperator* `()` kann die Funktion, auf die der Funktionspointer zeigt, dann aufgerufen werden.

Beispiel: Funktionspointer

```
int rechne(int (*func)(int a, int b), int a, int b) {
    return (*func)(a, b);
}

int add(int a, int b) { return a + b; }
int sub(int a, int b) { return a - b; }

int main() {
    int r;

    r = rechne(add, 2, 17); /* 19 */
    printf("%d\n", r);

    r = rechne(sub, 2, 17); /* -15 */
    printf("%d\n", r);
}
```

Das Beispiel verwendet Funktionspointer, um der Funktion `rechne()` zur Laufzeit eine beliebige Implementierung einer arithmetischen Operation zu übergeben.

Hier einmal dasselbe Beispiel in Java unter Verwendung von Lambdas:

```
import java.util.function.IntBinaryOperator;

public class Rechner {

    public static int rechne(IntBinaryOperator func, int a, int b) {
        return func.applyAsInt(a, b);
    }

    public static void main(String[] args) {
        IntBinaryOperator sub = (a, b) -> a - b;
        IntBinaryOperator add = (a, b) -> a + b;

        int r;

        r = rechne(add, 2, 17);
        System.out.println(r); /* 19 */


        r = rechne(sub, 2, 17);
        System.out.println(r); /* -15 */
    }
```

```
}
```

Index