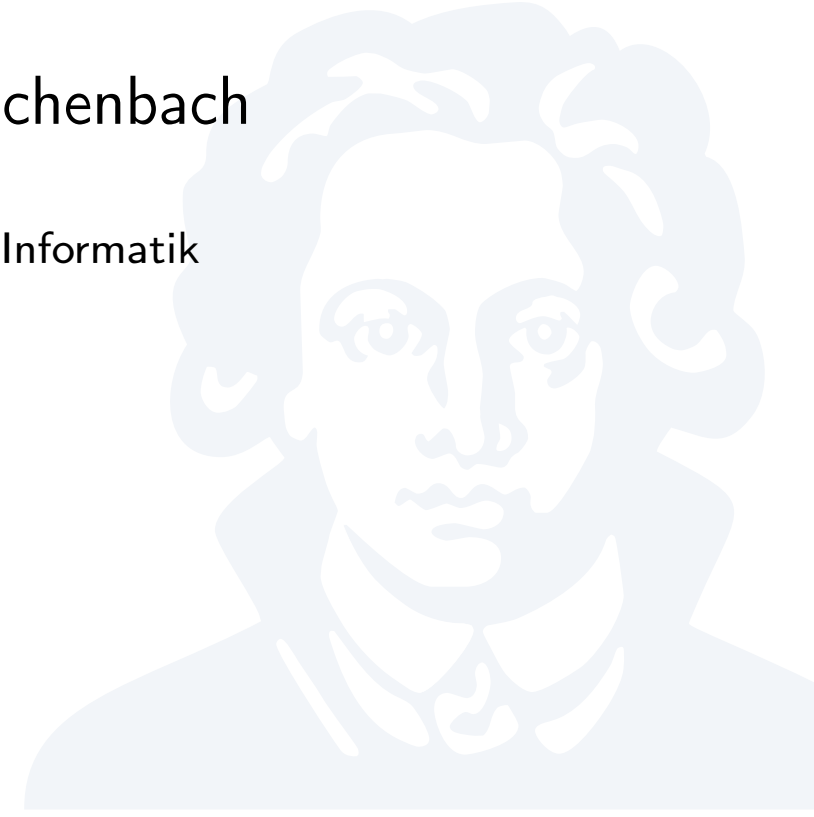
Einführung in die Systemprogrammierung
05

Prof. Dr. Christoph Reichenbach

Fachbereich 12 / Institut für Informatik

20. Mai 2014



Adressen in C

Lade/Schreiboperationen in Maschinensprache erlauben beliebigen Speicherzugriff:

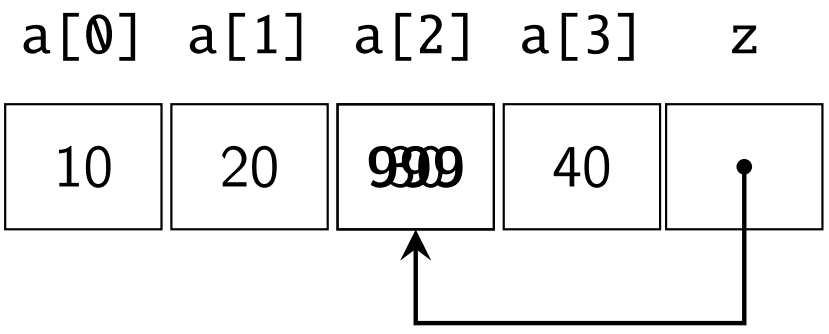
```
main:
  la    $t0, main
  sw    $zero, $t0(40)  # 10. Befehl überschreiben
  lb    $a0, $t0(-1)
  li    $v0, 1          # Davorliegendes Byte ausgeben
  syscall
```

- Register beinhalten Speicheradressen
- Für Systemprogrammierung nötig:
  - Hardwareansteuerung
  - Maschinencode-Erzeugung

C benötigt beliebigen Zugriff auf beliebige Adressen

C-Typ für Adressen: *Zeiger*

Zeiger



- `int *z`
  z hat Typ *Zeiger auf* `int`
- `z = &a[2]`
  Adreßoperator: `z` nimmt die Adresse von `a[2]`
- `*z`
  Dereferenzierungsopeartor: Greift auf `int`-Wert der Adresse von `z` zu
  `*z = 999`

Operationen auf Zeigern

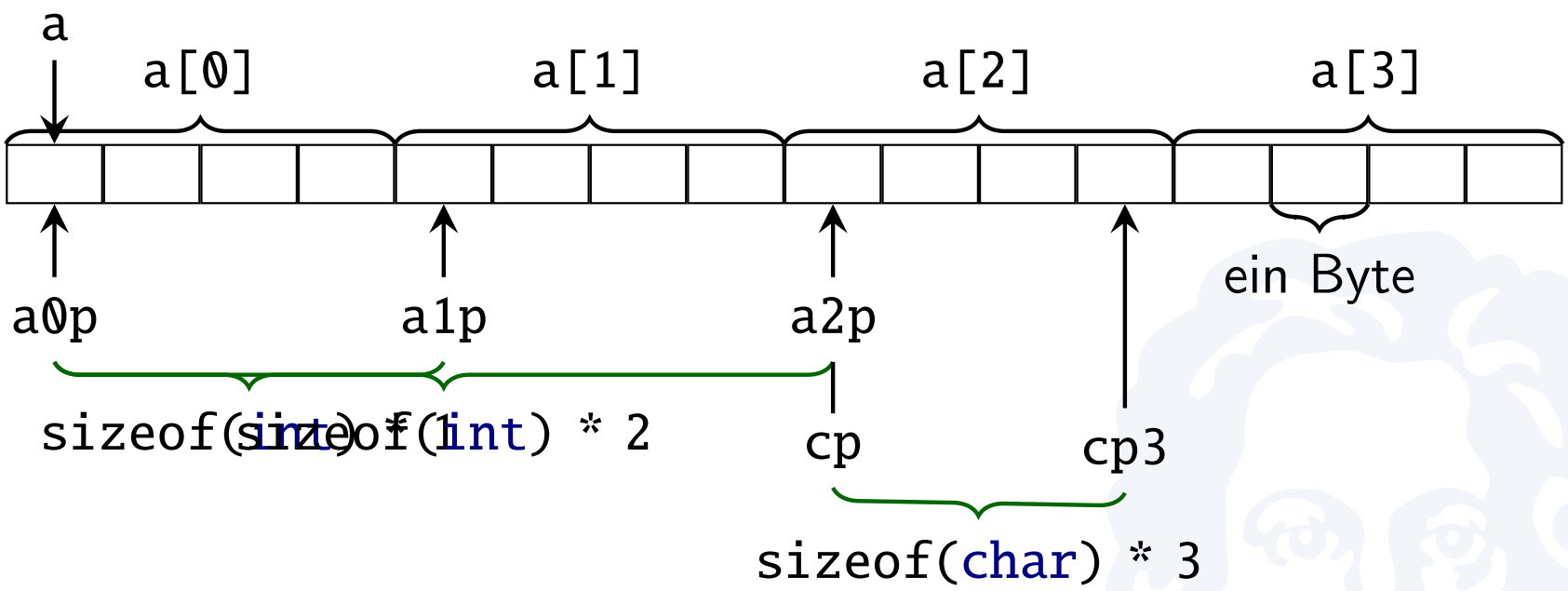
```
int a[4] = {10, 20, 30, 40};

main() {
  int *a_zeiger = &a;   // Zeigt auf Anfang
  int *a_ende = &a[3];  // Zeigt auf Ende
  while (a_zeiger <= a_ende) {
    int wert = *a_zeiger; // Speicherzelle lesen
    a_zeiger += 1;        // Eine int-Speicherzelle weiter
  }
}
```

- Typ für „*Zeiger auf t*“: `t*`
- *Adreßoperator* zur Adressierung: `&lvalue` (nur lvalues!)
- *Dereferenzierung* zum Auslesen: `*zeiger`

Zeigerarithmetik und `sizeof`

Annahme: **`sizeof`**`(int) = 4`, **`sizeof`**`(char) = 1`

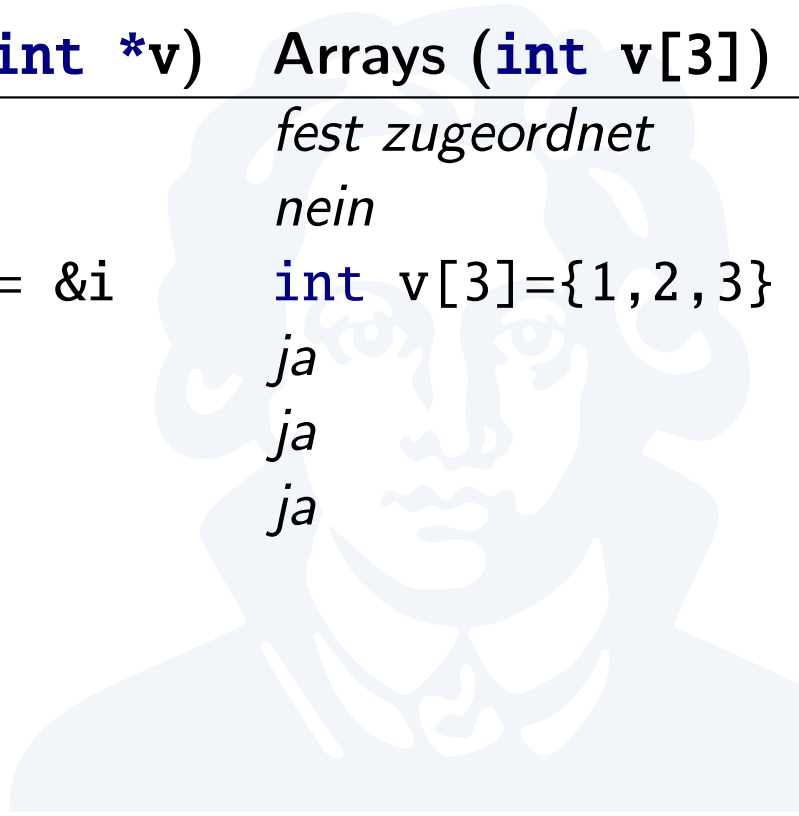



```
int a[4] = ...;
int *a0p = &a[0];
int *a1p = a0p + 1;
int *a2p = a0p + 2;
char *cp = (char *)a2p;
char *cp3 = cp + 3;
```

Zeiger und Arrays

```
int a[4] = ...;
int *a0p = a;     // arrays können als Zeiger dienen
```

		Zeiger (`int *v`)	Arrays (`int v[3]`)
Adresse		*beliebig*	*fest zugeordnet*
Modifizierbar	`v += 1`	*ja*	*nein*
Initialisierung		`int *v = &i`	`int v[3]={1,2,3}`
Lesbar	`int i = *v`	*ja*	*ja*
Schreibbar	`*v = 23`	*ja*	*ja*
Indizierung	`v[3]`	*ja*	*ja*



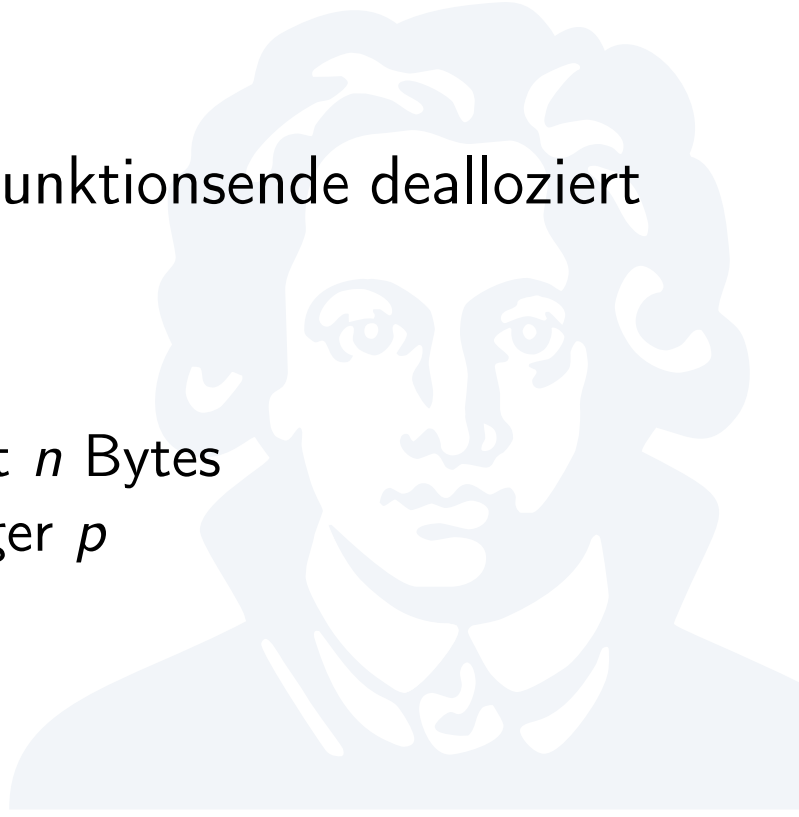
Bequeme Kurzformen:

- Array-Indizierung ist Kurzform für Addition und Dereferenzierung:
  `v[n] == *(v + n) == n[v]`
- Array mit unbekannter Anzahl von Elementen:
  `int a[] = { 1, 2, 3, 4, 5 }`
- Feldzugriff durch einen Zeiger:
  `a->b == (*a).b`

Zeiger und Speicherformen

Zeiger können in *alle* Speicherformen zeigen:

- Statisch:
  Zu Programmstart festgelegt
- Stapel:
  Bei Funktionsaufruf alloziert, bei Funktionsende dealloziert
- Ablagespeicher:
  Freie programmatische Kontrolle:
  - `void *malloc(int n)` alloziert n Bytes
  - `free(void *p)` dealloziert Zeiger p



malloc und free

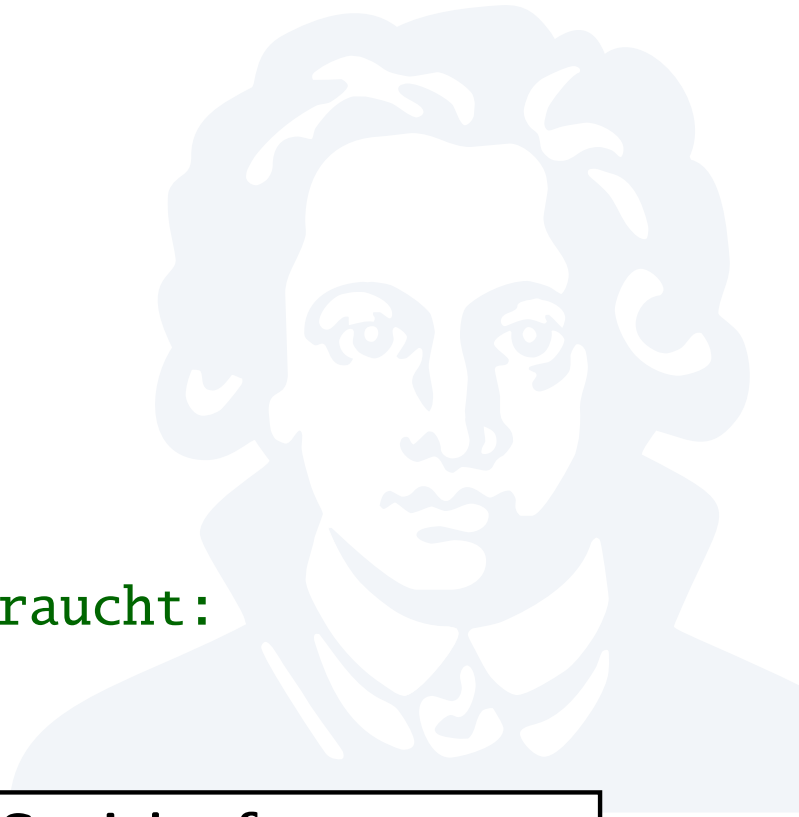
```
// Dynamische Allozierung auf Ablagespeicher
kundenkonto_t *konto =
        malloc(sizeof(kundenkonto_t));
// Platz für ein Konto

...

// Zugriff auf Feld im Konto:
konto->kundennr = 1000;

...

// Konten werden nicht mehr gebraucht:
free(konto);
```



Ablagespeicher: Flexibelste Speicherform

Der NULL-Zeiger

```
#include<stddef.h>
// Struktur für Binärbaum
struct knoten {
  // '*' muß bei mehreren Deklarationen wiederholt werden:
  struct knoten *links, *rechts;
  int wert;
};

main() {
  struct knoten *wurzel = malloc(sizeof(struct knoten));
  wurzel->wert = 0;
  wurzel->links = NULL;
  wurzel->rechts = NULL;
```

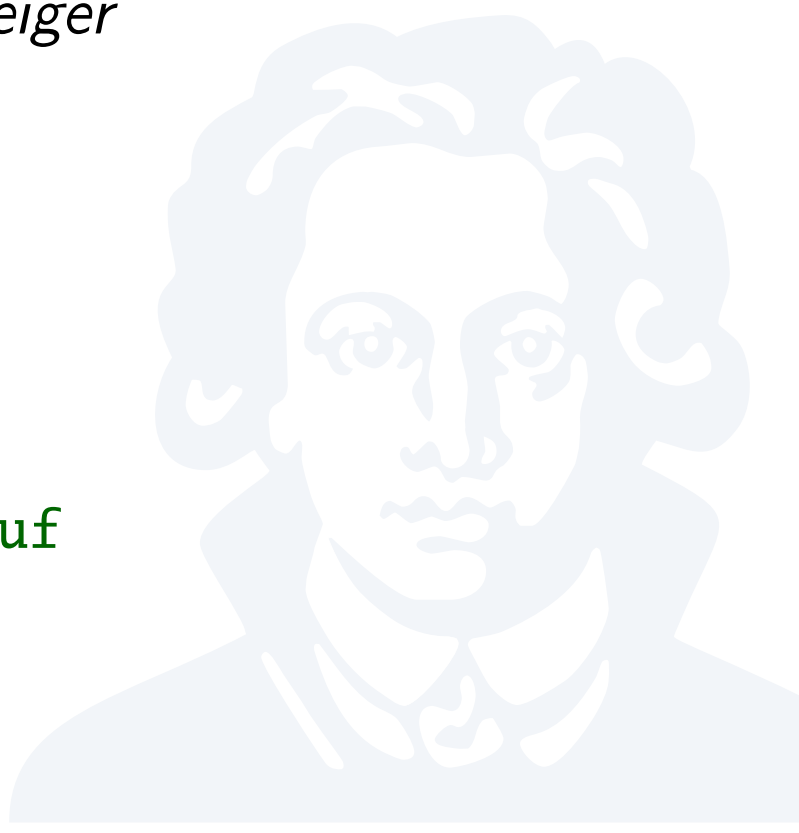
NULL (aus **stddef.h**) ist designierter „Zeiger nach Nirgendwo“

Zeiger auf Funktionen

- C unterstützt Zeiger auf alles, was im Speicher liegt
- Der Maschinencode von Funktionen liegt im Speicher
- Typsystem unterstützt *Funktionszeiger*

```
int f(unsigned, char);

main() {
  int (*p)(unsigned, char);
  p = &f;
  (*p)(0, 'x');  // Funktionsaufruf
}
```



Zusammenfassung: Zeiger

- Zeiger können auf beliebige Speicheradressen zeigen
- Adresse laden per Adreßoperator: `&lvalue`
- Speicherzugriff per Dereferenzierungsoperator: `*zeiger`
- Arrays können fast alles, was Zeiger können
- Zeigerarithmetik:
  - Zeiger verschieben mit + und -
  - Zeiger auf `t` ändert Adresse immer um Vielfaches von **`sizeof`**`(t)`
- **`NULL`**: designierter Zeiger, der auf kein Objekt zeigt
- Kombinierte Dereferenzierung/Strukturzugriff: `struktur->feld`
- Zeiger auf Funktionen:
  - Deklaration: *`rückgabetyp`* `(*zeiger)(`*`parametertypen`*`);`
  - Aufruf: `(*zeiger)(`*`tatsächliche parameter`*`)`

Kontext: Zeiger in anderen Sprachen

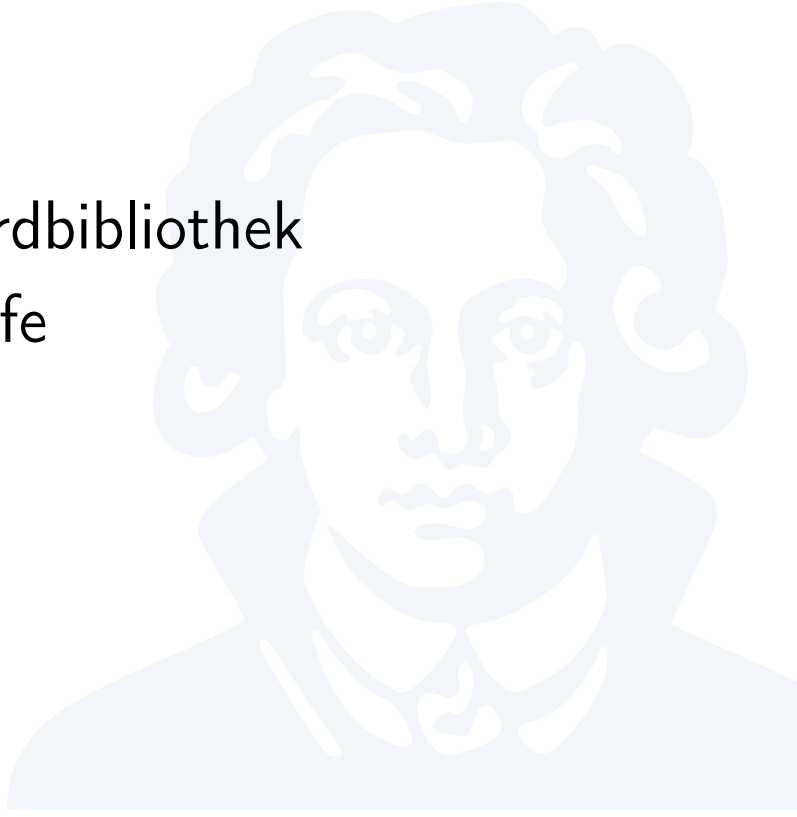
- Zeiger in C (und C++) sind sehr flexibel:
  - Beliebiger Speicherzugriff
  - Keine Einschränkungen durch Laufzeitsystem
- Diese Flexibilität ist für Systemprogrammierung nötig
- Andere Sprachen (Java, Haskell, ...) haben andere Anforderungen:
  - *Typsicherheit*: Alle Typfehler werden vom Übersetzer oder Laufzeitsystem entdeckt
  - *Automatische Speicherverwaltung*: Ablagespeicher nicht per `free` freigegeben (häufige Fehlerquelle!) sondern automatisch
- Zeiger machen Typsicherheit und automatische Speicherverwaltung unmöglich

Alle Operatoren

Operatoren (stärker bindende oben)	Arg.	Assoz.
(*Ausdruck*) [...] -> .	2	links
! ~ ++ - + - (typ) * & **sizeof**	1	rechts
* / %	2	links
+ -	2	links
<< >>	2	links
< <= >= >	2	links
== !=	2	links
&	2	links
^	2	links
|	2	links
&&	2	links
||	2	links
... **?** ... **:** ...	3	rechts
= += -= *= /= %= <<= >>= |= &= ^=	2	rechts
,	2	links

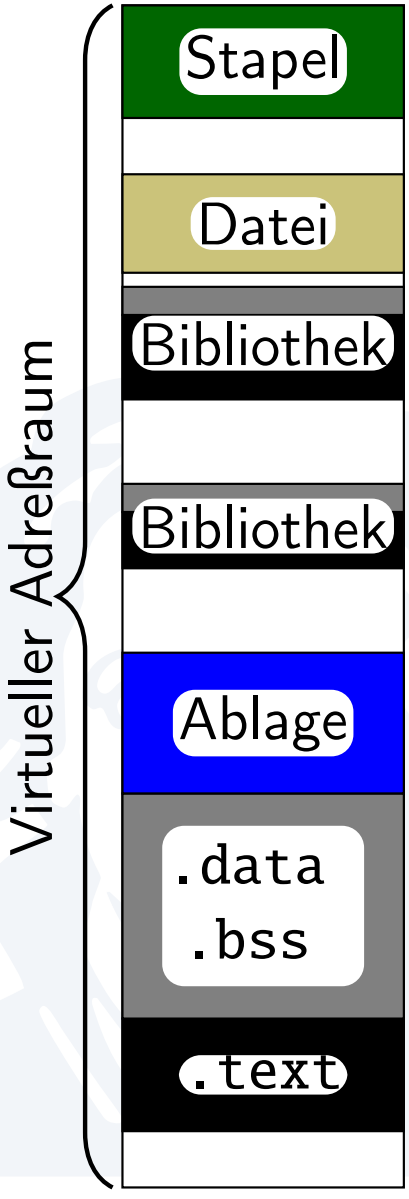
Das Laufzeitsystem der Sprache C

- Speicheraufteilung (Wiederholung)
- Speicherlokationen von Variablen
- Speicher und Seitentabelle
- Speicheroperationen der C-Standardbibliothek
- Stapelspeicher und Funktionsaufrufe
- Ablagespeicher



Wiederholung: Speicher zur Laufzeit

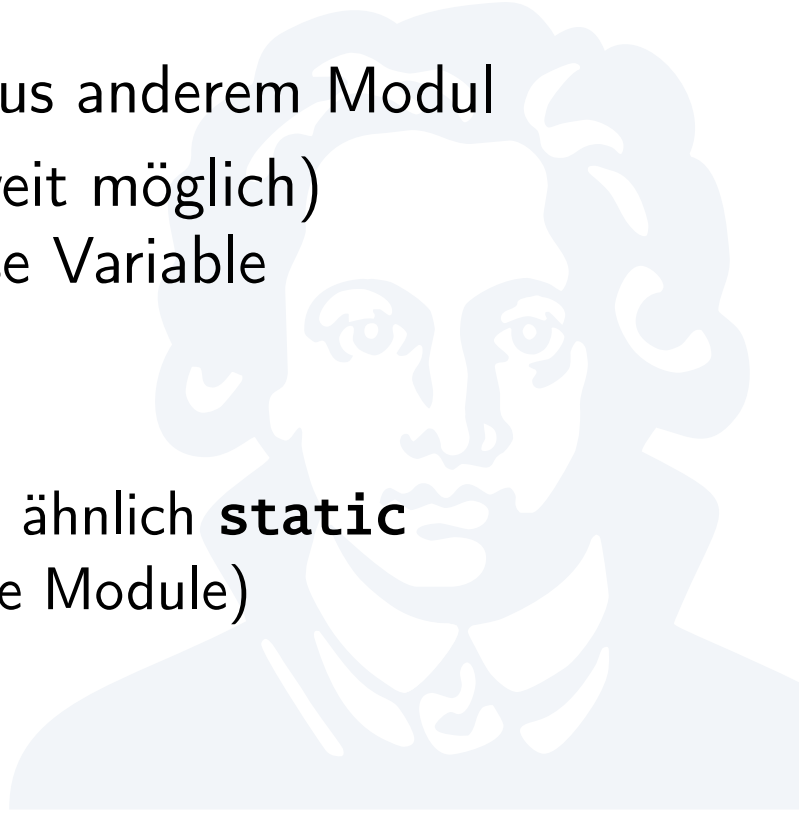
- Stapelspeicher
  - Lokale Variablen
  - Parameter
  - Rücksprungadressen
- Ablagespeicher
  - `malloc` etc.
- `.data`, `.bss`:
  - Statische/Globale Variablen
- `.text`:
  - Funktionen



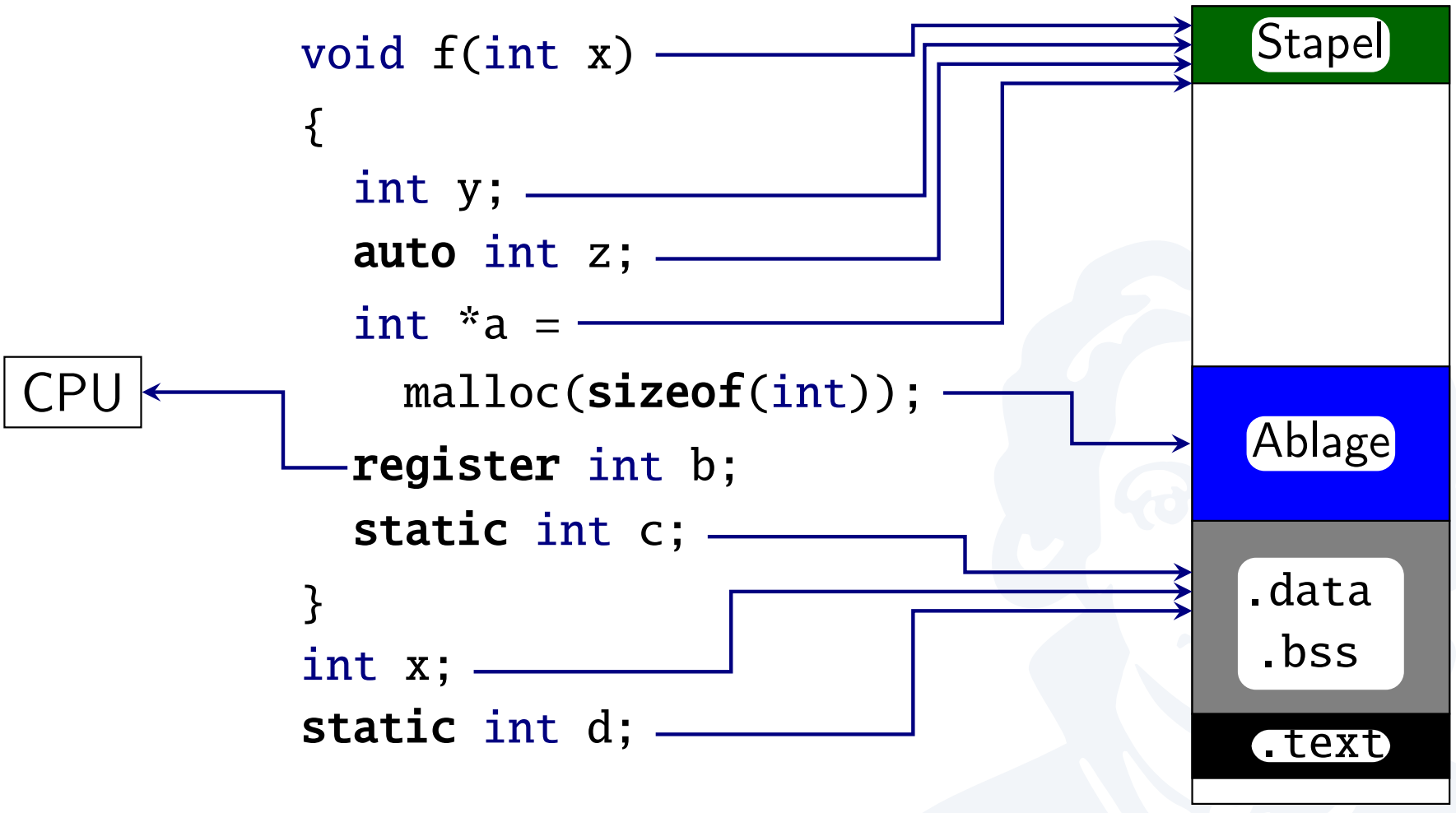
Variablen im Speicher

Speicherklassen: geben u.a. an, wo Variablen im Speicher liegen

- **`auto`**: Auf dem Stapelspeicher
- **`static`**: Im statischen Speicher
- **`extern`**: Im statischen Speicher, aus anderem Modul
- **`register`**: In einem Register (soweit möglich)
  Verbietet den **&**-Operator auf diese Variable
- Ohne Angabe?
  - In Funktionskörper: wie **`auto`**
  - Außerhalb des Funktionskörpers: ähnlich **`static`**
    (Unterschied: Sichtbar für andere Module)



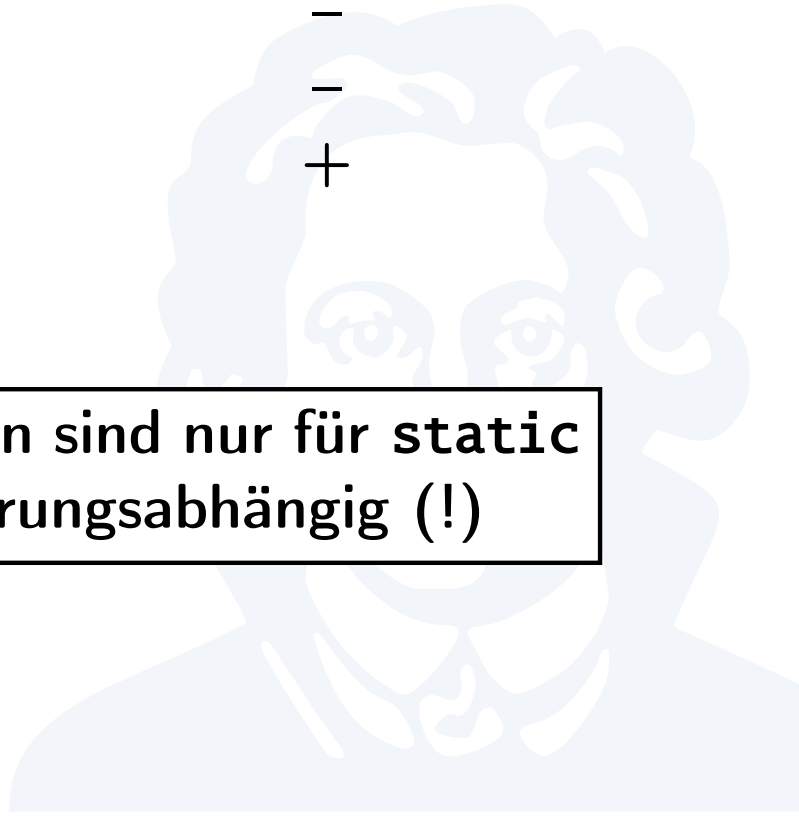
Speicher und Variablen



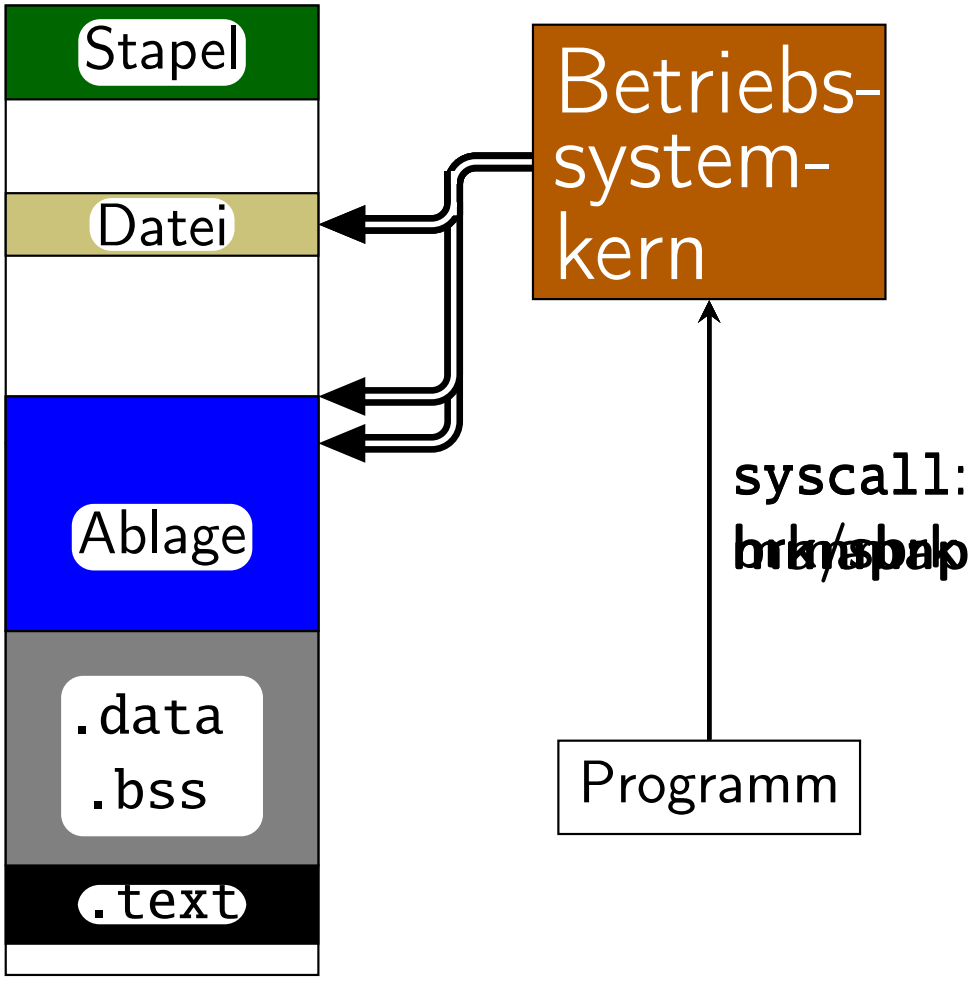
Speicherklassen für verschiedene Variablen

	Toplevel	In Funktionskörper	Parameter
`auto`	–	+	–
`static`	+	+	–
`extern`	+	+	–
`register`	–	+	+

Inhalte von uninitialisierten Variablen sind nur für `static` vorbestimmt, sonst implementierungsabhängig (!)



Speicher, Seitentabelle, Systemaufrufe in UNIX

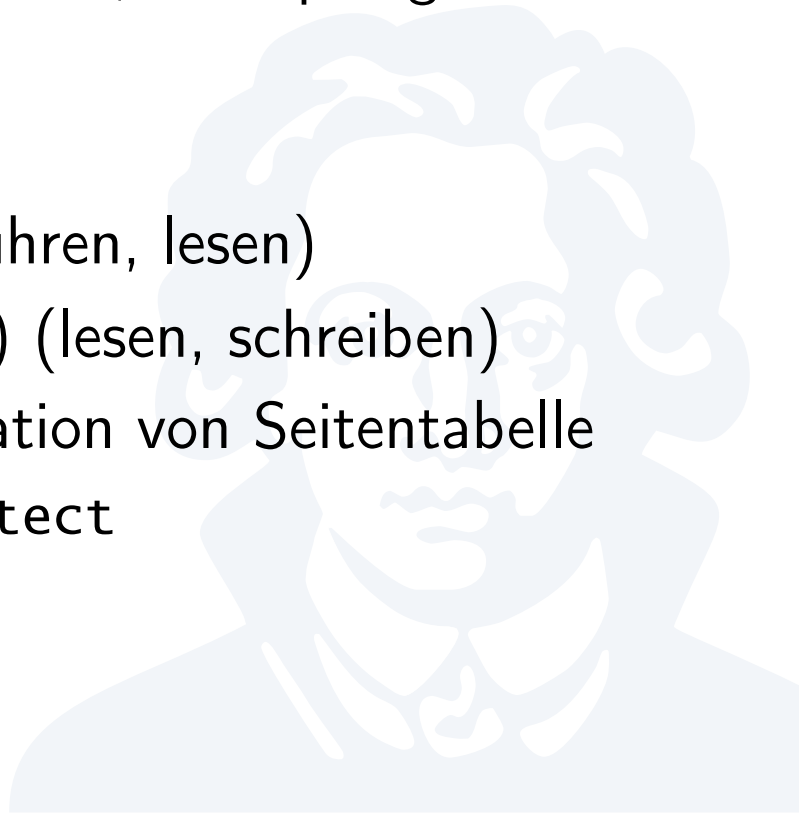


- Programmstart: Stapel, statischer Speicher, Programmspeicher
- Systemaufruf `brk/sbrk`: Ablage alloziert/wächst
- Systemaufruf `mmap`: Datei oder leerer Speicher wird in Speicher abgebildet
- Systemaufruf `munmap`: Abbildung wird entfernt

Diese syscalls werden meist nur implizit von der Standardbibliothek ausgeführt

Zusammenfassung: Speicher in C

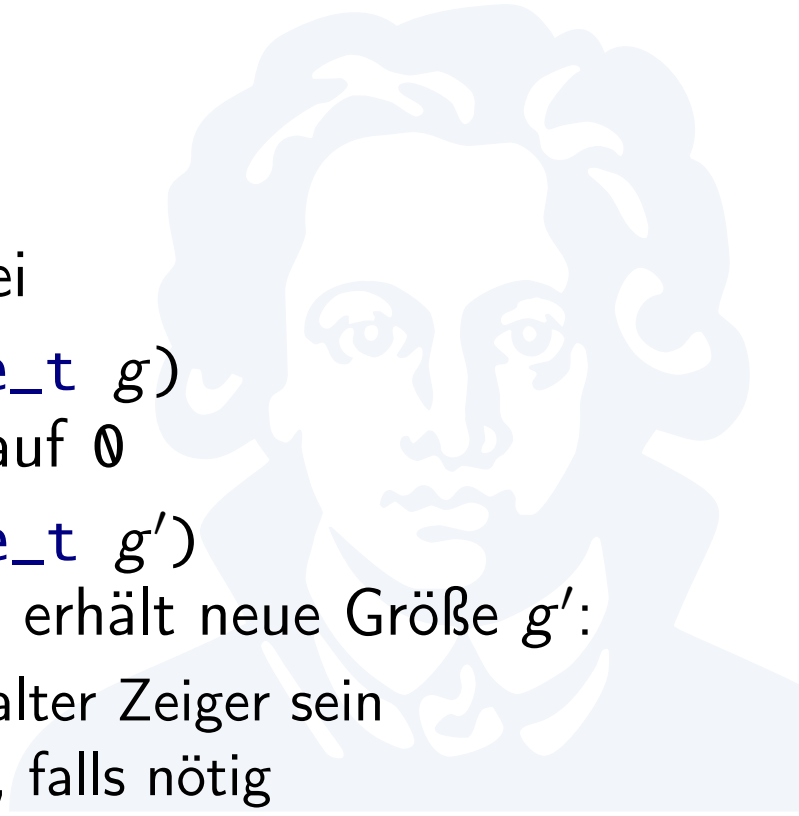
- Stapelspeicher (lesen, schreiben)
  - Funktionsparameter, lokale Variablen, Rücksprungadresse
- Ablagespeicher (lesen, schreiben)
  - `malloc()`, `free()`
- Programmspeicher (`.text`) (ausführen, lesen)
- Statischer Speicher (`.data`, `.bss`) (lesen, schreiben)
- Zahlreiche `syscalls` zur Manipulation von Seitentabelle
  - `brk/sbrk`, `mmap/munmap/mprotect`



Ablagespeicheroperationen

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

- Systemaufrufe `brk`, `sbrk` allozieren neue Seiten für Ablagespeicher
  (Normalerweise nicht selbst aufrufen)
- `void *malloc(size_t g)`
  Alloziert g Bytes
- `free(void *p)`
  Gibt allozierten Zeiger p wieder frei
- `void *calloc(size_t n, size_t g)`
  Alloziert $n \times g$ Bytes, initialisiert auf `0`
- `void *realloc(void *p, size_t g')`
  Allozierter Zeiger p (alte Größe g) erhält neue Größe g':
  - Rückgabewert kann neuer oder alter Zeiger sein
  - $\min(g, g')$ Bytes werden kopiert, falls nötig



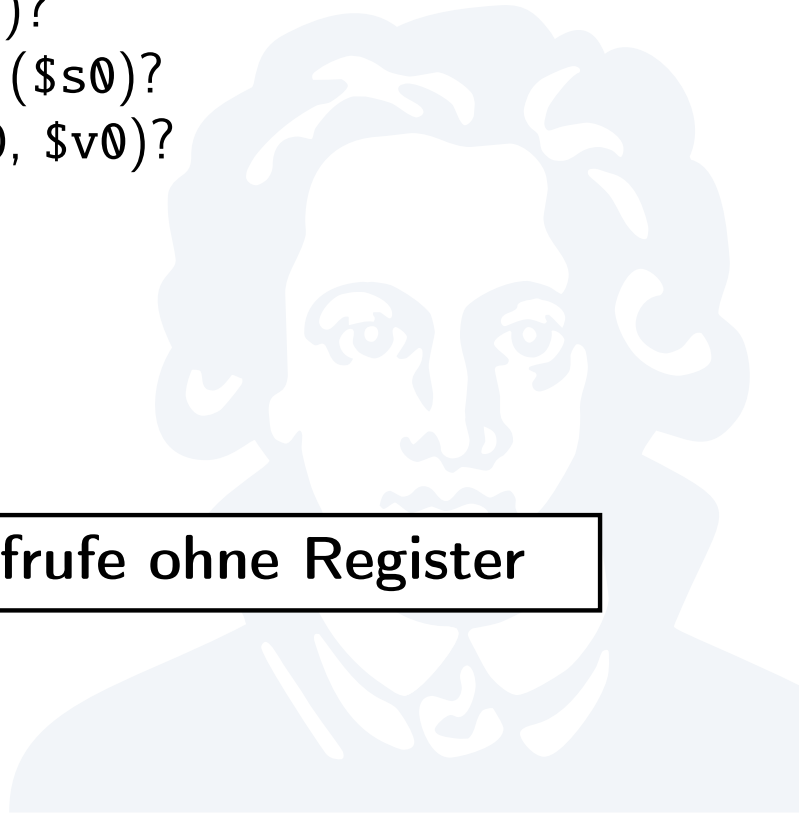
Blockspeicheroperationen

```
#include<string.h>
```

- Verschieben und Kopieren von Speicherblöcken ist manchmal in der Systemprogrammierung nötig
- Effiziente Implementierungen nichttrivial, daher in C-Standardbibliothek
- `memcpy(void *z, void *q, int g)`
  Kopiert g Bytes ab q nach z. Zielregion und Quellrequion dürfen nicht überlappen.
- `memmove(void *z, void *q, int g)`
  Kopiert g Bytes ab q nach z. Zielregion und Quellrequion können überlappen.
- `memset(void *z, int n, int g)`
  Setzt g Bytes ab z auf Byte-Wert n.
- `strcpy(void *z, void *q)`
  Kopiert Speicher ab q nach z, bis (und inklusive) dem ersten `0`-Byte. Zielregion und Quellrequion dürfen nicht überlappen.

Funktionsaufrufe (Wiederholung)

- Funktionsaufrufbehandlung ist komplex:
  - Unterscheidung bei Registern:
    - Vom Aufrufer zu sichern (`$t0`)?
    - Vom Aufgerufenen zu sichern (`$s0`)?
    - Zur Übergabe verwendet (`$a0`, `$v0`)?
  - Aufrufstapelverwaltung

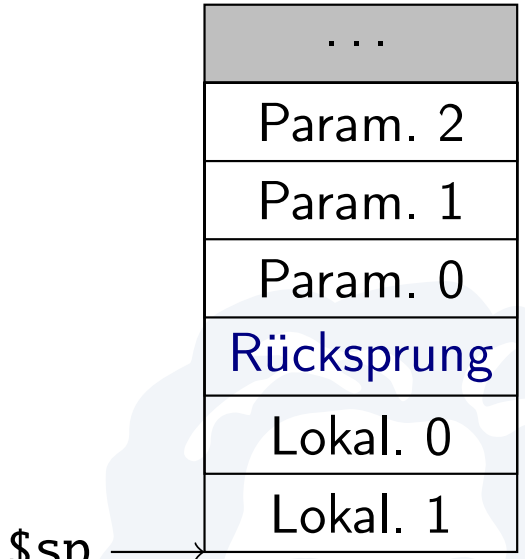


Betrachten wir vereinfachend Aufrufe ohne Register

Funktionsaufrufe in C

(Annahme: Aufrufkonventionen ohne Register)

- Stapel sichert Aufrufdaten („Aufrufstapel“):
  - Parameter
  - Lokale (nicht-statische/globale) Variablen
  - Rücksprungadresse (bei Bedarf)
- Zugriff auf Stapelinhalte: $\texttt{\$sp} + c$
  - c ist Konstante, da Stapelgröße bekannt

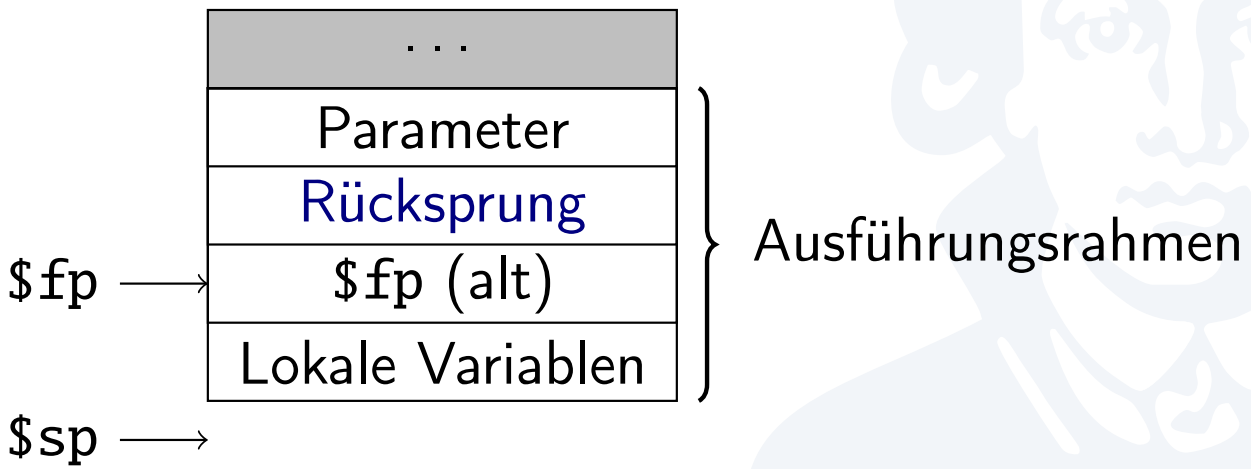



```
int f(int x) {
    int y;
    int a[x*x];
...
}
```

Arrays mit dynamischer Größe ⇒ Stapelgröße unbekannt!

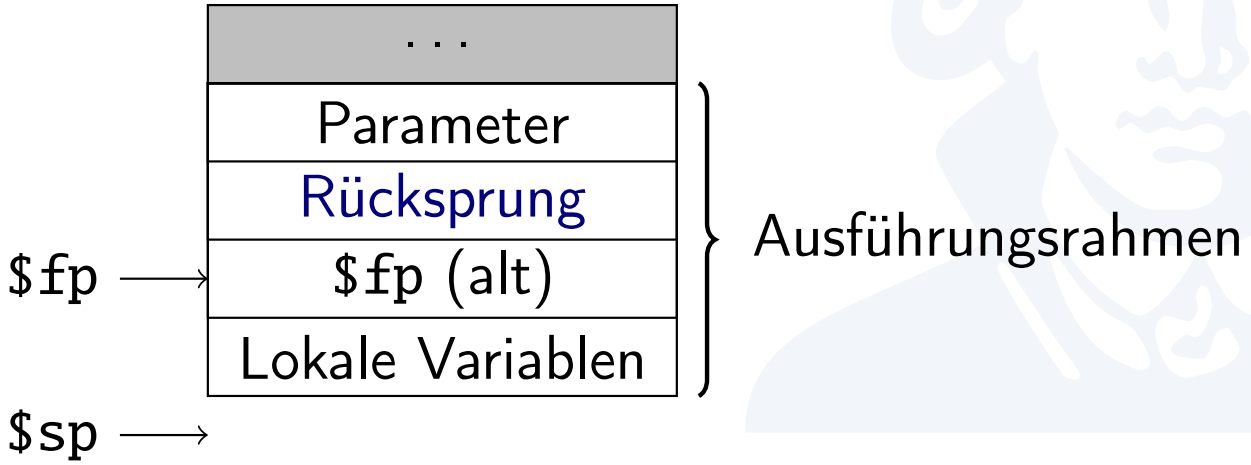
Der Rahmenzeiger `$fp`

- `$sp` + *c*-Zugriff nur möglich mit *bekannter* Stapelgröße
- Einige Dinge bewirken *unbekannte* Stapelgröße:
  - Arrays mit dynamischer Größe (`int a[x*x];`)
  - Stapel-inlining (Optimierung)
  - obstack (gcc-Spracherweiterung)
- Lösung: *Rahmenzeigerregister* `$fp` bleibt konstant
  - Zugriff auf Parameter/lokale Variablen per `$fp` + *c*



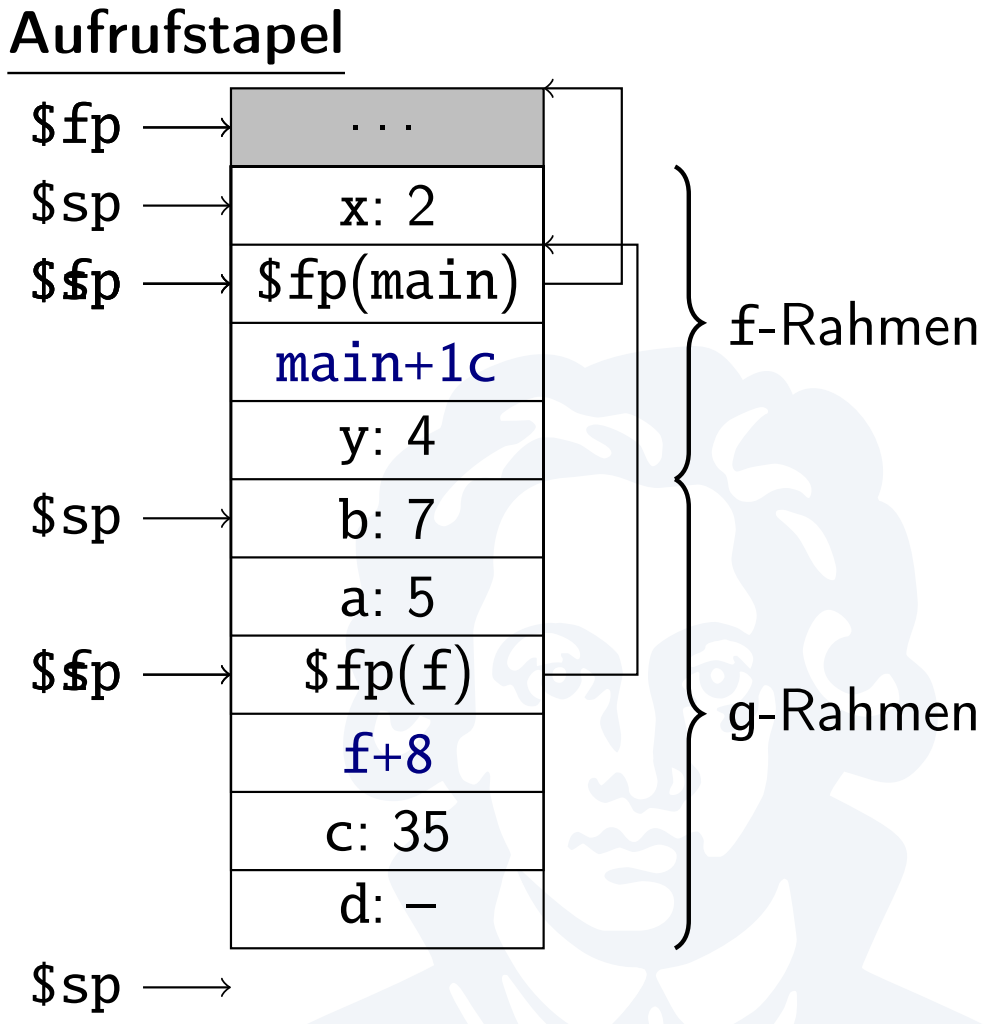
Der Ausführungsrahmen

- *Ausführungsrahmen*:
  (*activation record*, stack frame)
  - Parameter
  - Gesicherte Rücksprungadresse
  - Gesicherter alter Rahmenzeiger
  - Lokale Variablen
- Reihenfolge von Rücksprungadresse, Rahmenzeiger, Lokalen Variablen ist beliebig (kein Einfluß auf Kommunikation mit anderen Subroutinen)



Funktionsaufrufe und Stapel

```
int main()
...
    f(2); //main+1c
...
int f(int x) {
    int y = x * 2;
    return g(y+1, 7); //f+8
}
int g(int a, int b) {
    int c = a * b;
    if (c < 0) {
        int d = b - a;
        return d * (c - d);
    }
    return c;
}
```



Aufruf (ohne Param.-Register)

Aufrufer:

- Sichert vom Aufrufer zu sichernde Register (`$t0`, ...)
- Vergrößert `$sp` für Parameter
- Schreibt Parameter
- Springt (`jal`)

***Aufgerufener*:**

- Sichert:
  - `$fp` des Aufrufers
  - Rücksprungadresse
  - vom Aufgerufenen zu sichernde Register (`$s0`, ...)
- Setzt `$fp` = `$sp`
- Vergrößert `$sp` für Ausführungsrahmen

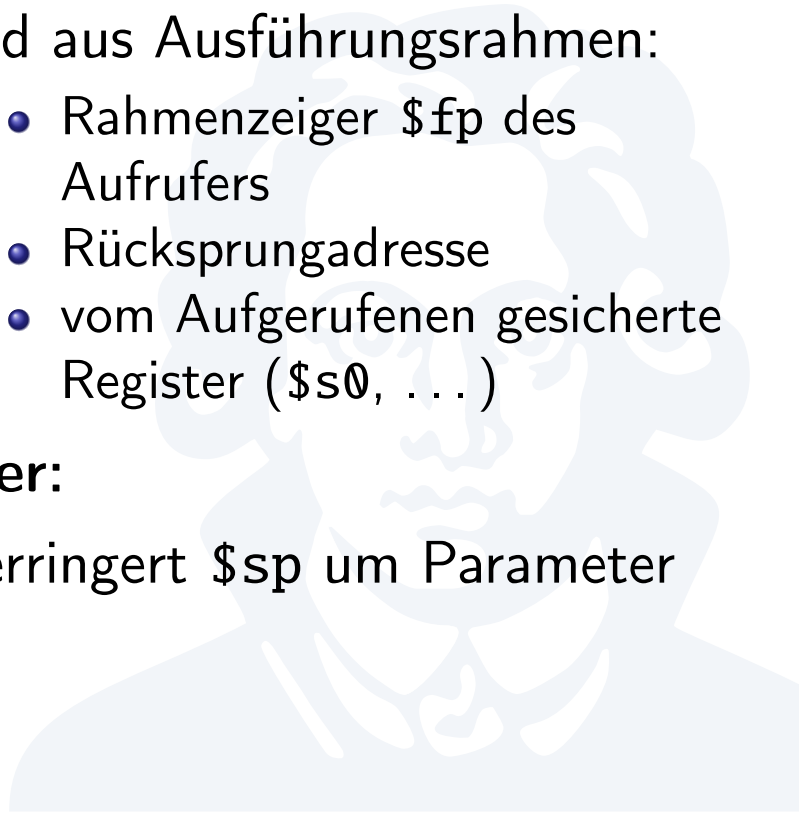
Rücksprung

***Aufgerufener*:**

- Lade Rückgabewert in Rückgaberegister (`$v0`)
- Stellt `$sp` wieder her (`$sp` = `$fp`)
- Läd aus Ausführungsrahmen:
  - Rahmenzeiger `$fp` des Aufrufers
  - Rücksprungadresse
  - vom Aufgerufenen gesicherte Register (`$s0`, ...)

Aufrufer:

- Verringert `$sp` um Parameter

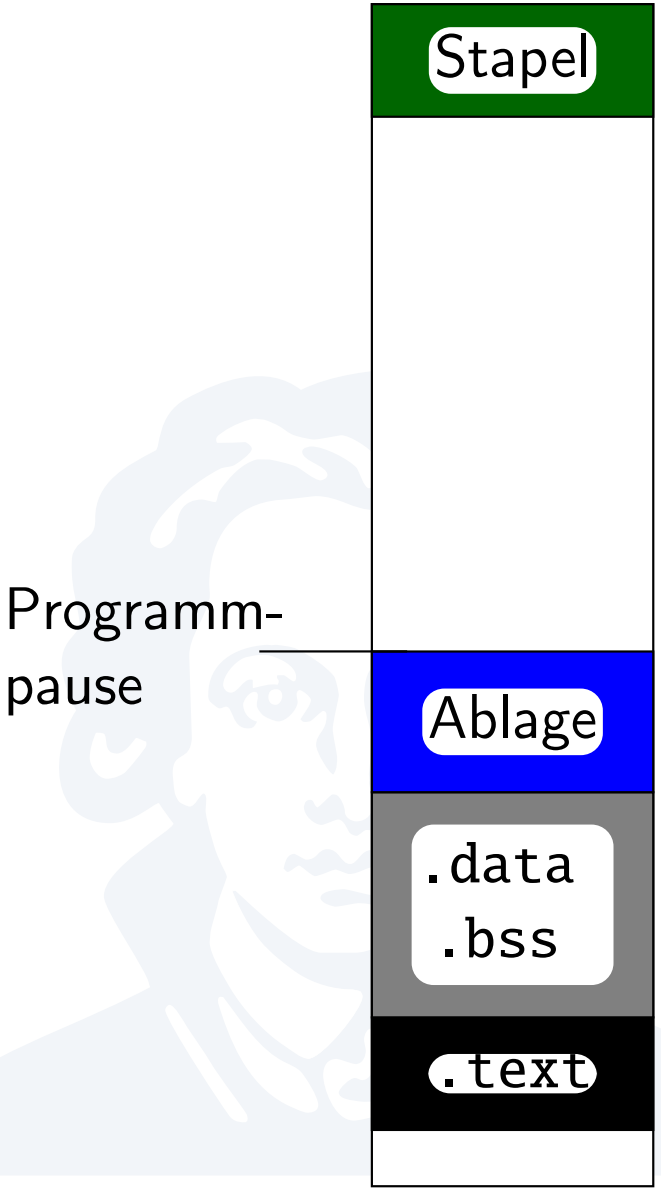


Funktionsaufrufe: Sonderfälle

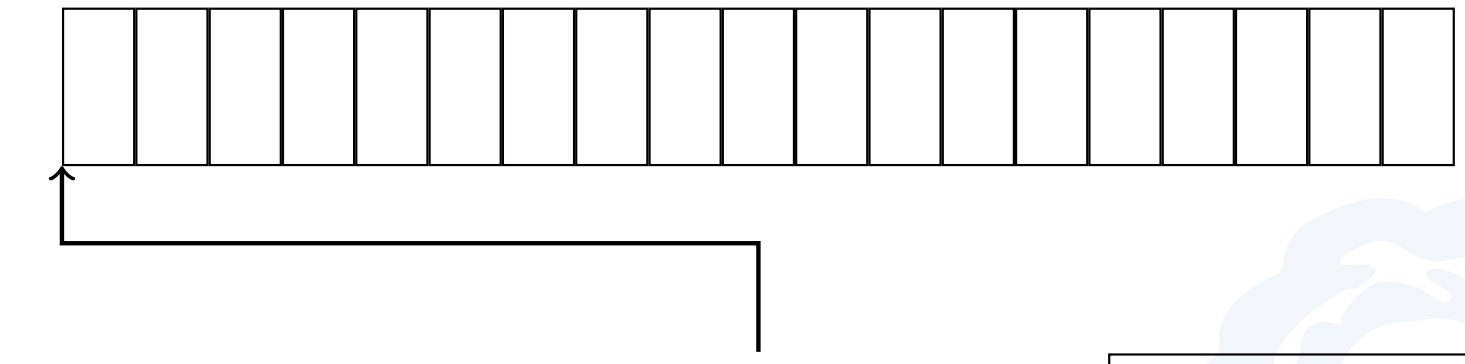
- Zuletzt betrachtet: Allgemeinfall
- Spezialfälle:
  - *Feste Stapelgröße*:
    Kann `$sp`+*c* statt `$fp`+*c* verwenden, `$fp` für anderes
  - *Alles paßt in Register, keine Rekursion*:
    Kann auf Ausführungsrahmen verzichten
  - *Rückgabewert zu groß für Rückgaberegister*:
    Aufrufer reserviert Stapelplatz bei Aufruf, Rückgabewert auf Stapel geschrieben
  - *Inlining-Optimierung*:
    Übersetzer ‘kopiert’ aufgerufene Funktion in Aufruferkörper, kein Aufruf nötig

Programmpause und Ablagespeicher

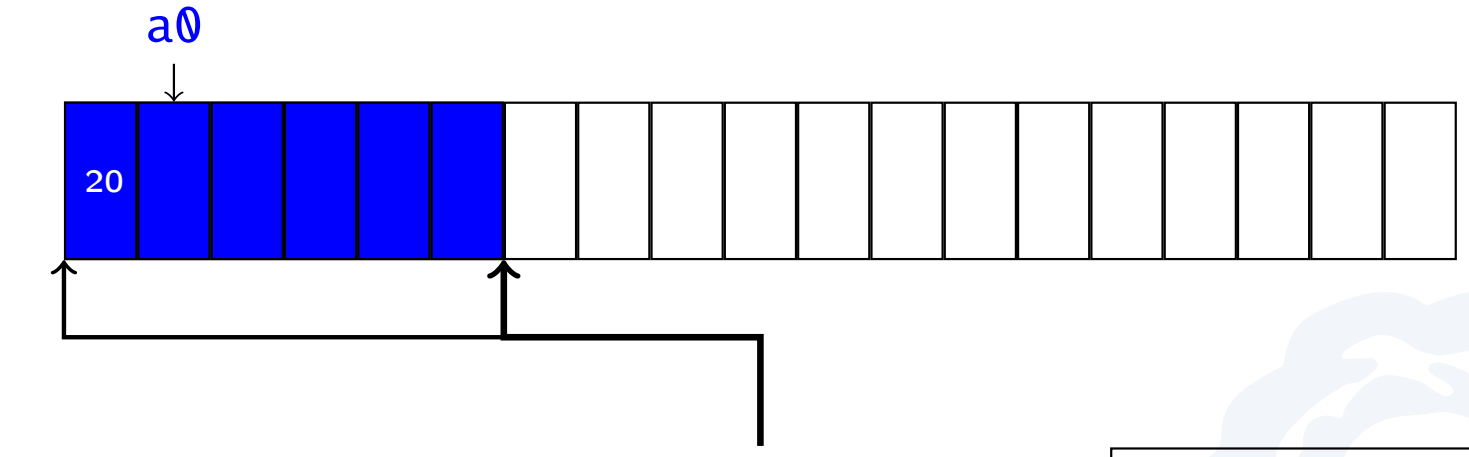
- *Programmpause* markiert oberes Ende des Ablagespeichers
- Bedarf erhöht: Systemaufrufe `brk`, `sbrk`
- Abstand zu Adresse der ersten Bibliothek idealer größer als verfügbarer Speicher
  - Einfach bei 64 Bit
  - 32 Bit: festgesetzte Maximalgröße
- Programmpause meist indirekt über Systembibliothek verwaltet (`malloc()`/`free()`)



Der First Fit-Algorithmus für Ablagespeicher



Der First Fit-Algorithmus für Ablagespeicher



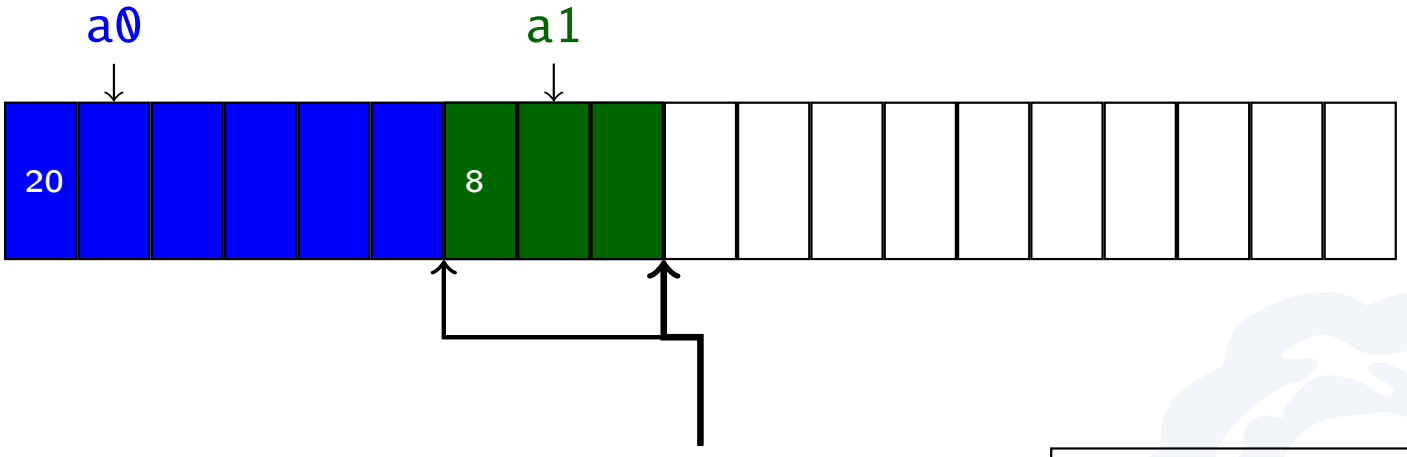
Freiliste $\longrightarrow$ *nil*

Programmpause

1 Kästchen = 4 Bytes

a0 = malloc(20); (*4 Bytes pro Block*)

Der First Fit-Algorithmus für Ablagespeicher



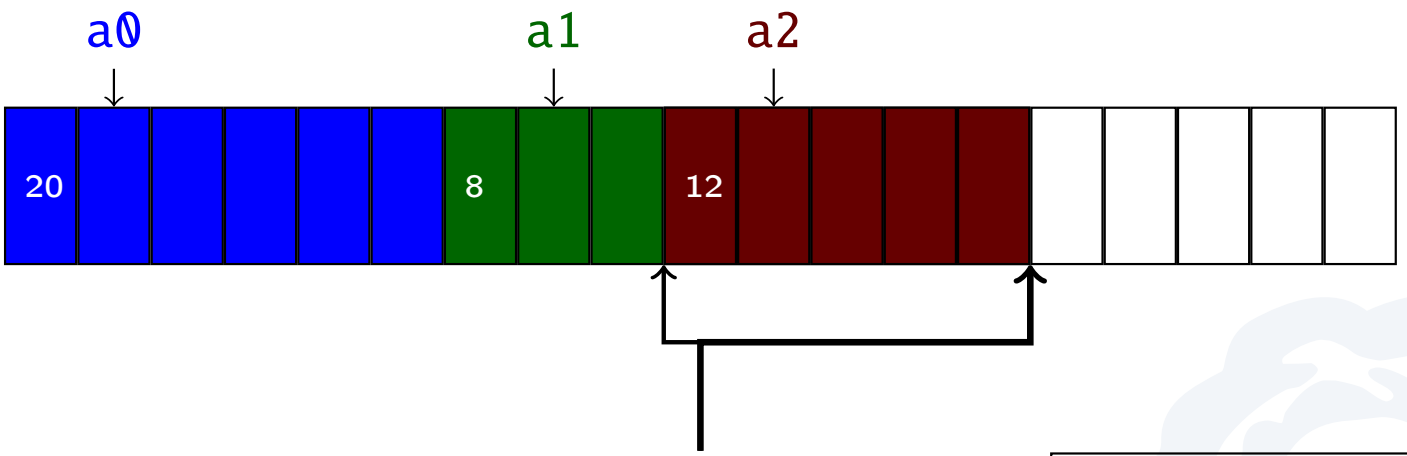
Freiliste $\longrightarrow$ *nil*

Programmpause

1 Kästchen = 4 Bytes

```
a0 = malloc(20); (4 Bytes pro Block)
a1 = malloc(8);
```

Der First Fit-Algorithmus für Ablagespeicher



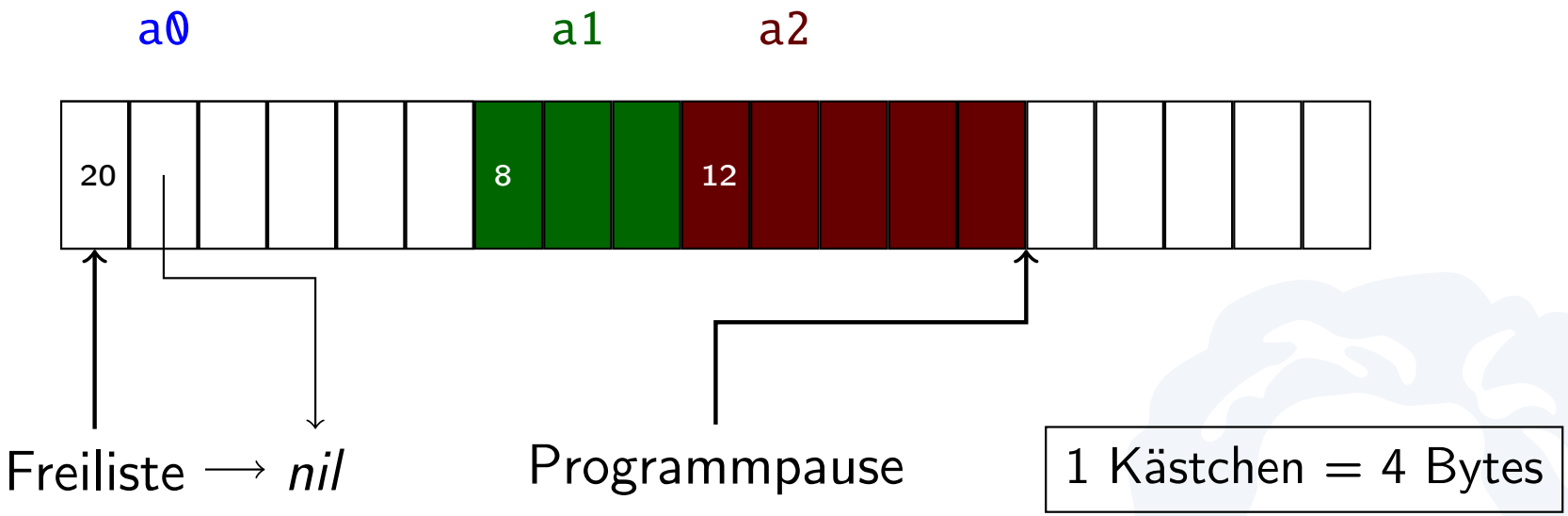
Freiliste $\longrightarrow$ *nil*

Programmpause

1 Kästchen = 4 Bytes

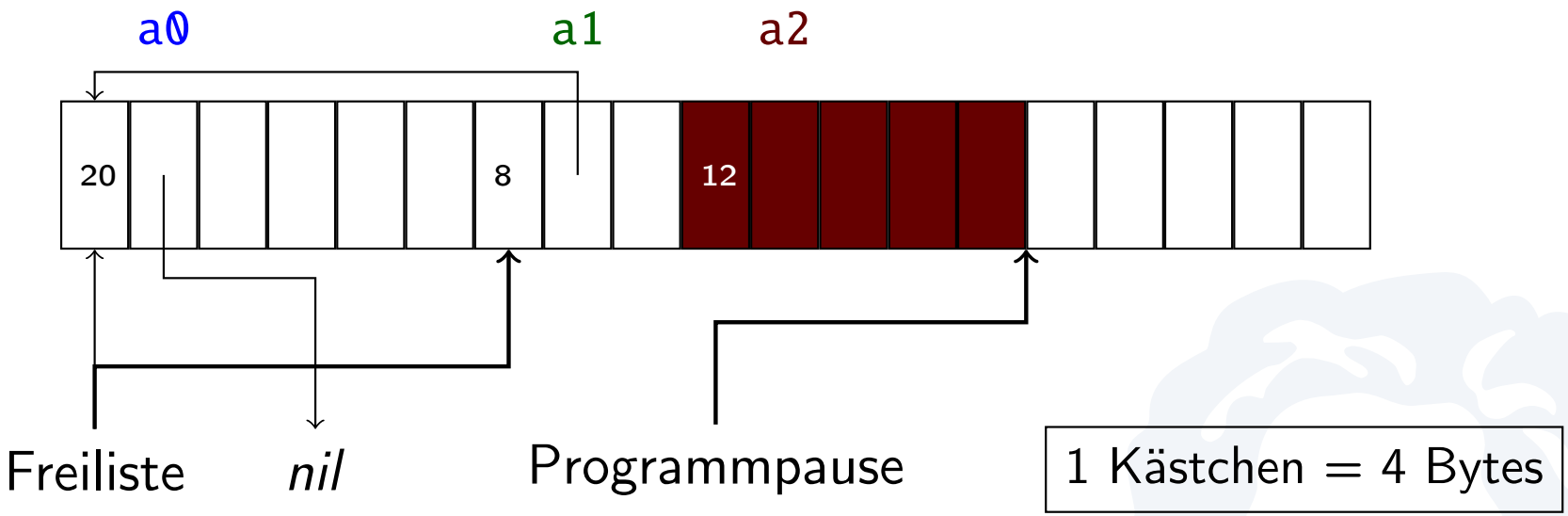
```
a0 = malloc(20); (4 Bytes pro Block)
a1 = malloc(8);
a2 = malloc(12);
```

Der First Fit-Algorithmus für Ablagespeicher



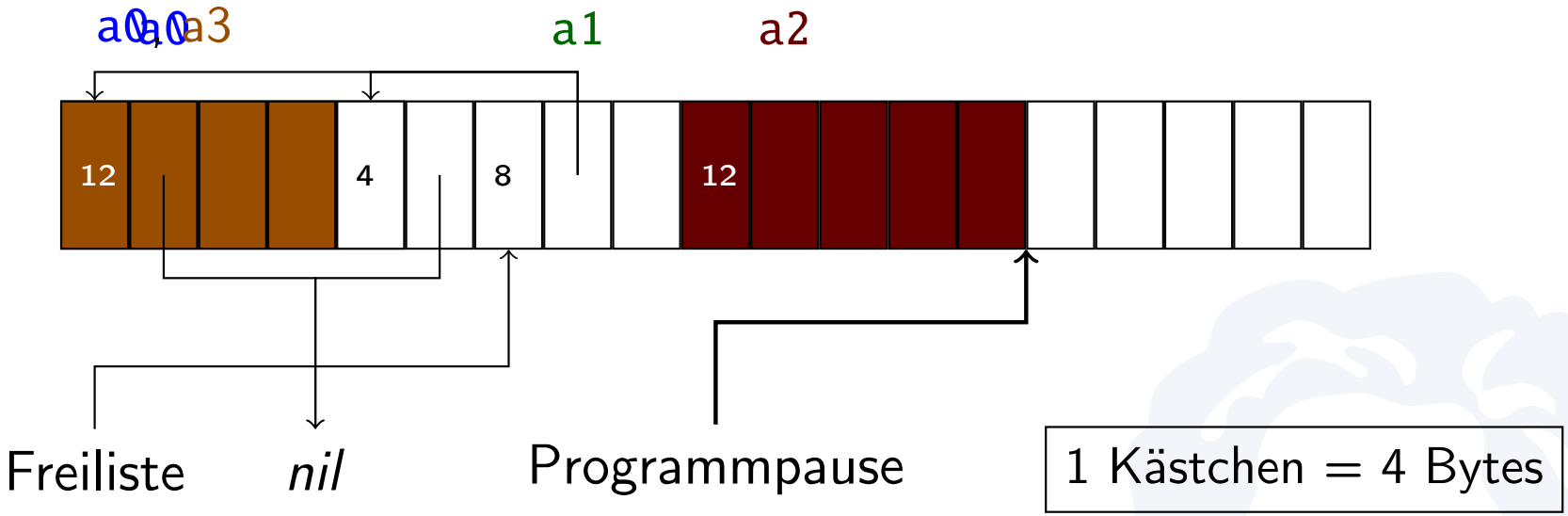

```
a0 = malloc(20); (4 Bytes pro Block)
a1 = malloc(8);
a2 = malloc(12);
free(a0);
```

Der First Fit-Algorithmus für Ablagespeicher




```
a0 = malloc(20); (4 Bytes pro Block)
a1 = malloc(8);
a2 = malloc(12);
free(a0);
free(a1);
```

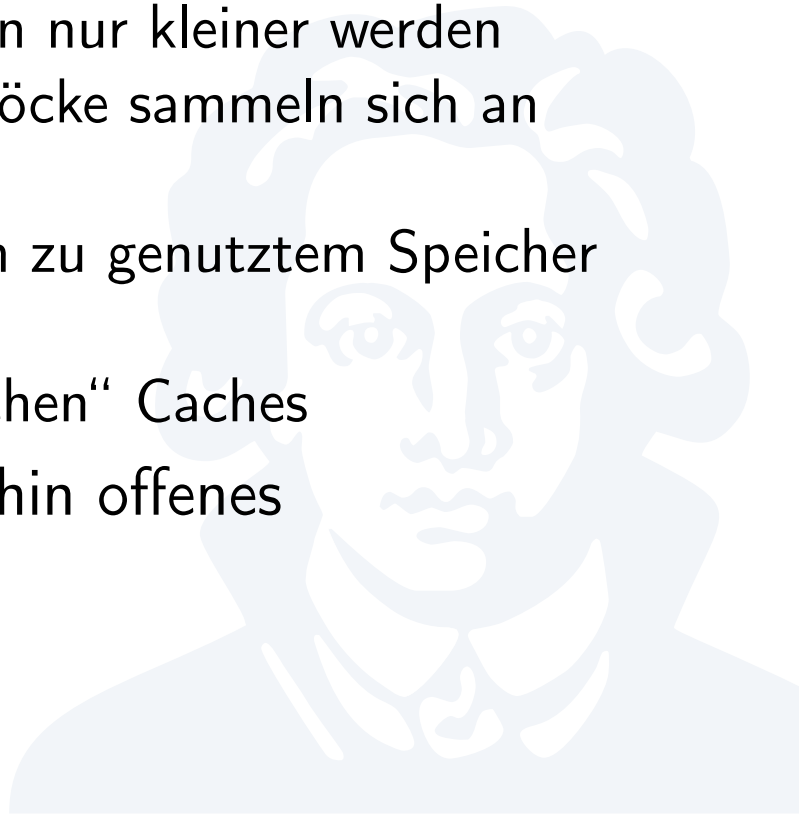
Der First Fit-Algorithmus für Ablagespeicher




```
a0 = malloc(20); (4 Bytes pro Block)
a1 = malloc(8);
a2 = malloc(12);
free(a0);
free(a1);
a3 = malloc(12);
```

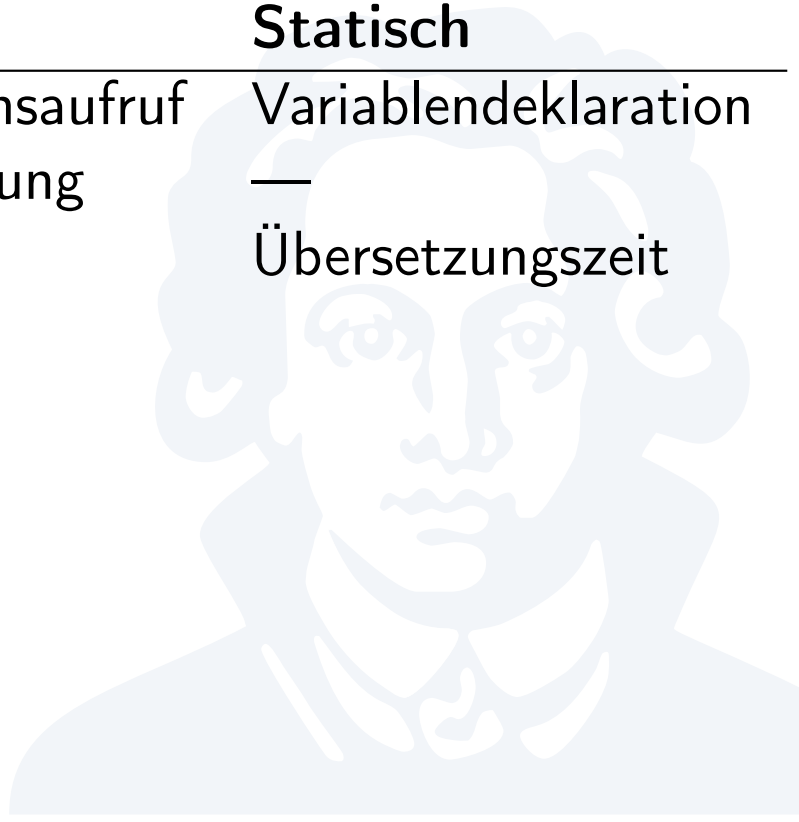
Probleme des First Fit-Algorithmus

- Allozierungszeit $O(k)$ mit k Einträgen in Freiliste
- Speicherfragmentierung über Zeit:
  - Wiederverwendete Blöcke können nur kleiner werden
  - (zu) kleine, weniger nützliche Blöcke sammeln sich an Ende der Freiliste an
  - Verhältnis von Verwaltungsdaten zu genutztem Speicher nimmt tendentiell zu
  - Sprünge bei Blocksuche „verseuchen“ Caches
- „ideale“ Speicherverwaltung weiterhin offenes Forschungsthema



Vergleich: Speicherformen

Eigenschaft	**Ablage**	**Stapel**	**Statisch**
Allozierung	`malloc`	Funktionsaufruf	Variablendeklaration
Deallozierung	`free`	Rücksprung	—
Größenfestlegung	Laufzeit	Laufzeit	Übersetzungszeit

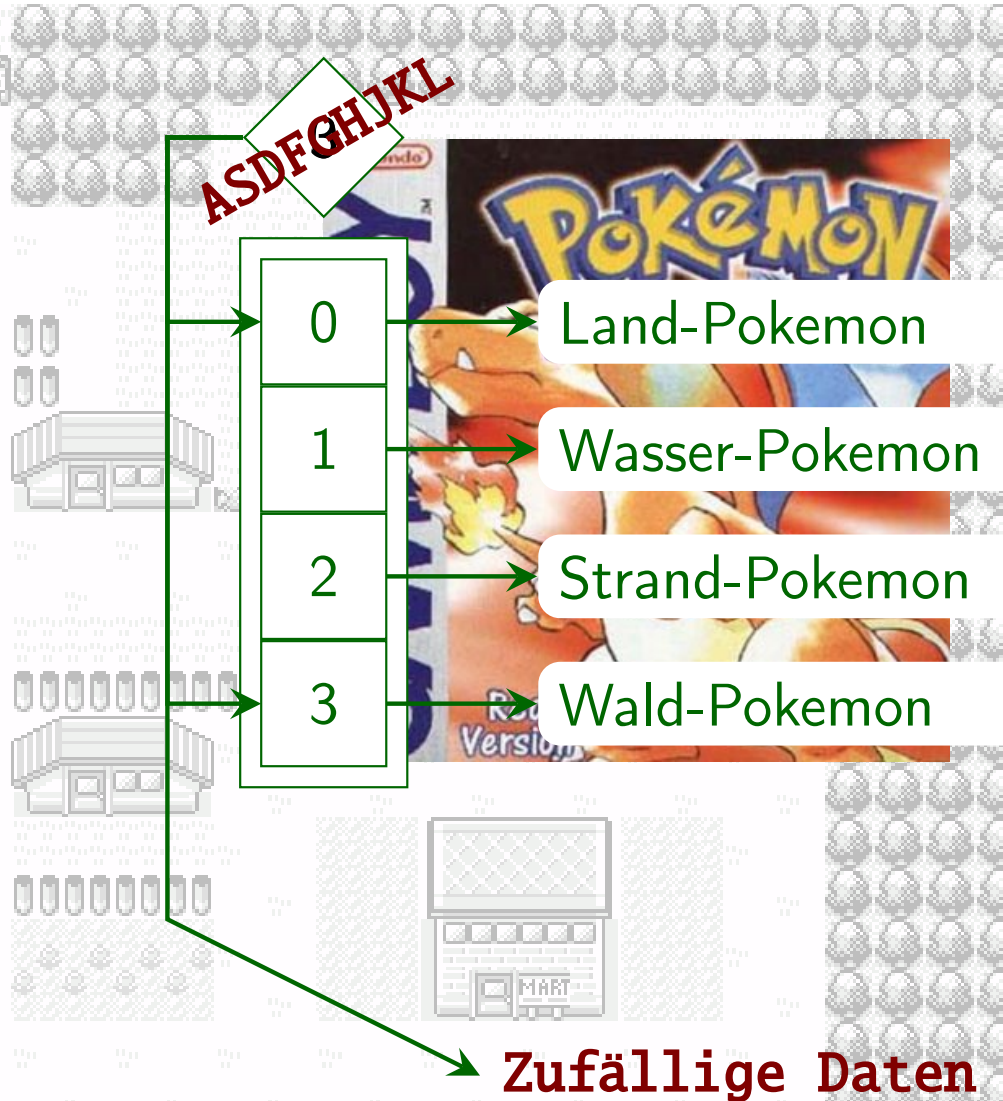


Rückblick: Laufzeitumgebung

Laufzeitumgebung besteht aus:

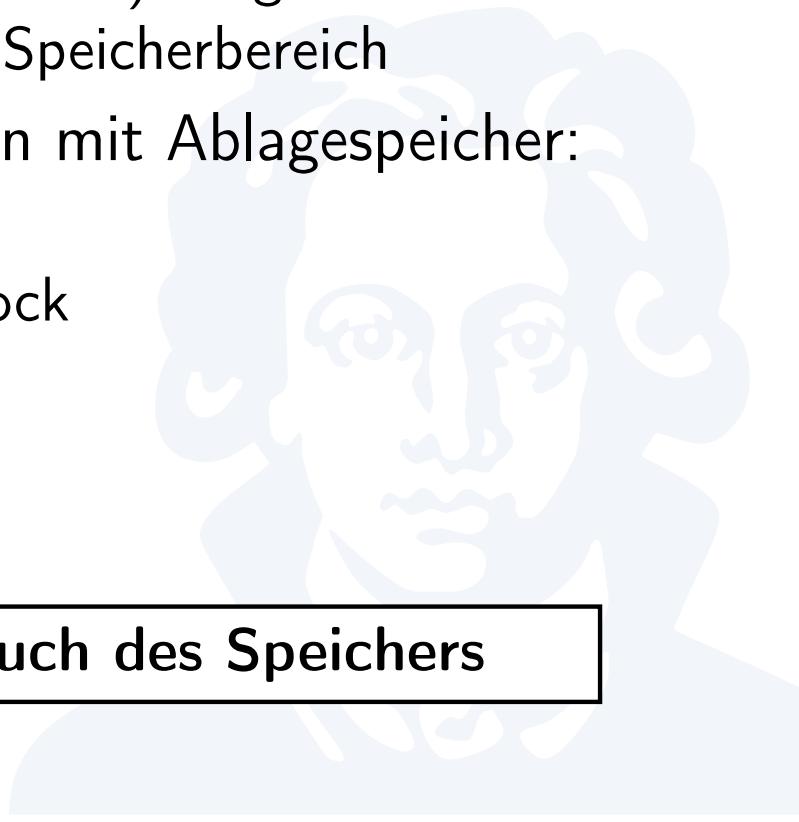
- Nichtpriveligiert (*user space*):
  - `.text`, `.data`, `.bss`
  - Stapelspeicher
  - Ablagespeicher
  - Obige beinhalten:
    - Bibliotheksdienste (z.B. Speicherverwaltung)
    - Programmiersprachenspezifische Dienste
  - Registerinhalte
- Betriebssystemkern (*kernel space*) mit Prozeßkontext:
  - Seitentabelle
  - Offene Dateien
  - Offene Netzwerkverbindungen
  - Kommunikation mit anderen Prozessen
  - Sicherungskopien der Register, falls nötig
  - ...

Speicher in Eingebetteten Systemen



Speicherfehler

- Fehler in Zeigerarithmetik
- Lese-/Schreibzugriff auf deallozierten Speicher
  - „Hängender Zeiger“ (dangling pointer): zeigt unbeabsichtigt auf deallozierten Speicherbereich
- Besonders viele Fehlermöglichkeiten mit Ablagespeicher:
  - `free` vergessen
  - `free` auf schon deallozierten Block
  - `free` vor Speicherzugriff

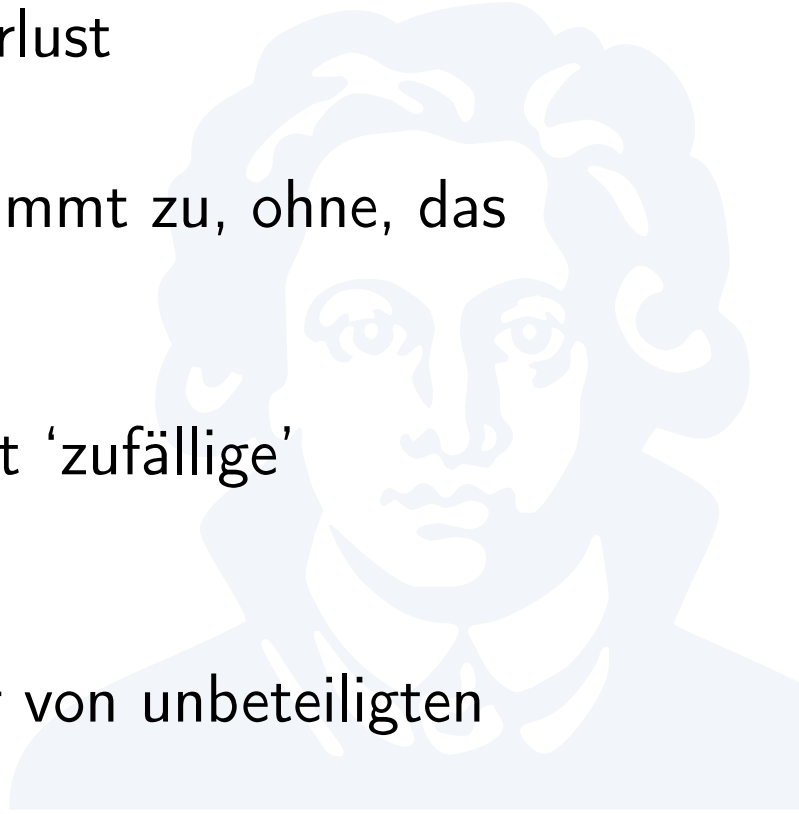


Speicherfehler führen zu Mißbrauch des Speichers

Speicherfehler: Folgen

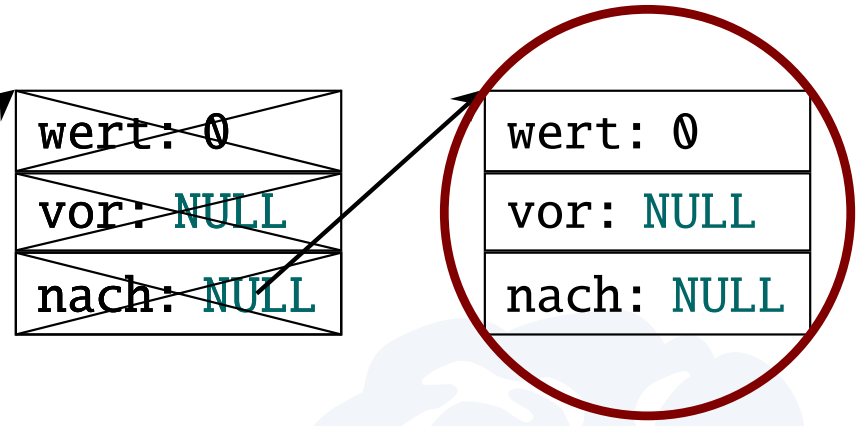
Speicherfehler können folgende Konsequenzen haben:

- Segmentierungsfehler
  Betriebssystem entdeckt Speicherfehler
- Nicht ausgerichteter Speicherzugriff
  Busfehler oder Geschwindigkeitsverlust
- Speicherleck
  Speicherbedarf des Programmes nimmt zu, ohne, das Speicher wirklich verwendet wird
- Ungültiger Wert
  Programmcode liest unbeabsichtigt ‘zufällige’ Speicherinhalte
- Speicherkorruption
  Programmcode verändert Speicher von unbeteiligten Modulen



Speicherlecks

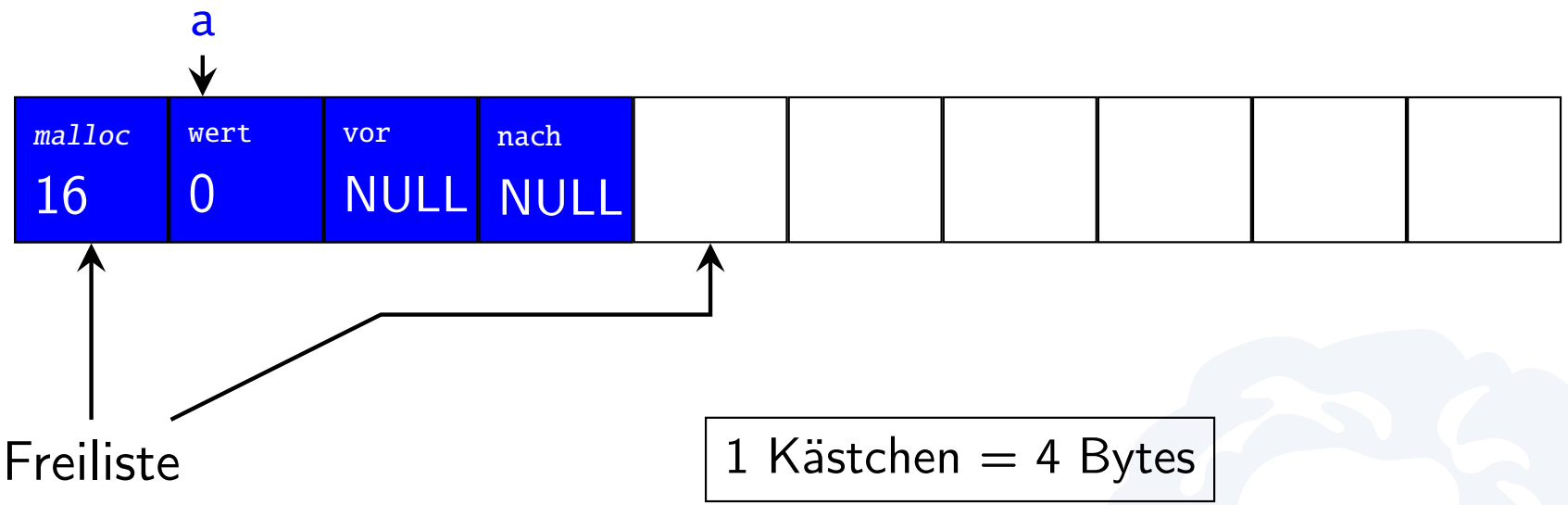
```
typedef struct k {
  int wert;
  struct k *vor;
  struct k *nach;
}
```




```
⇒knoten_t *a = calloc(1,sizeof(knoten_t));
⇒a->nach = calloc(1,sizeof(knoten_t));
⇒free(a);
```

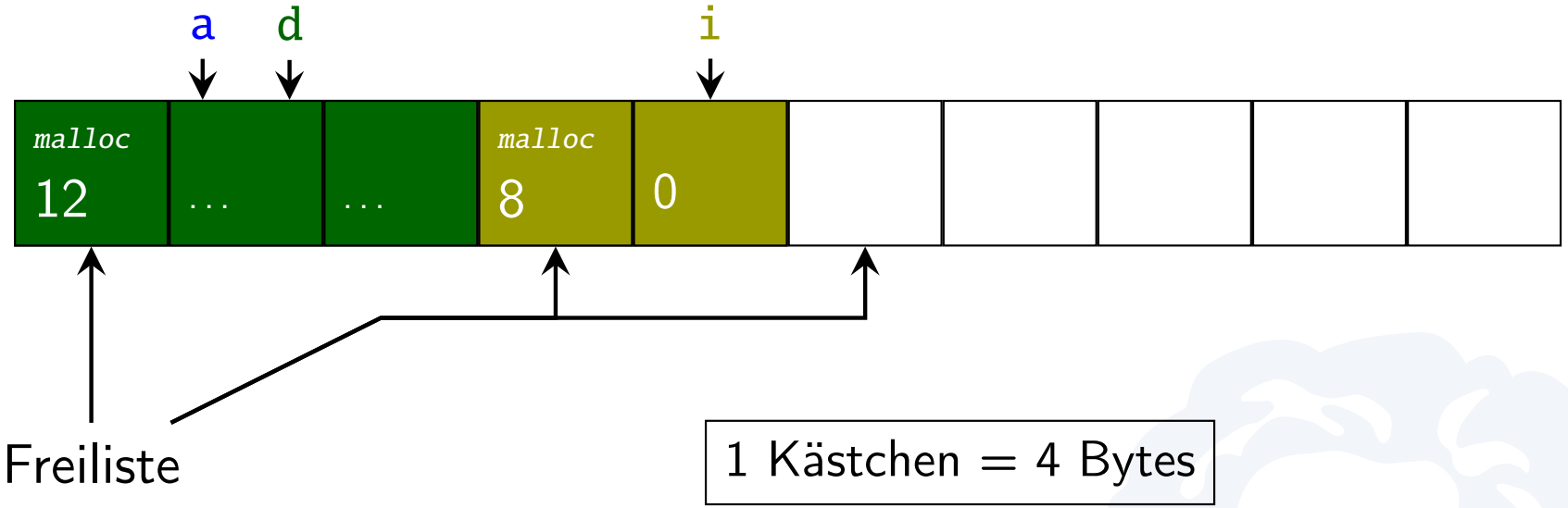
Speicherleck: Speicher kann nicht deallokiert werden, ist permanent unbrauchbar

Speicherkorruption



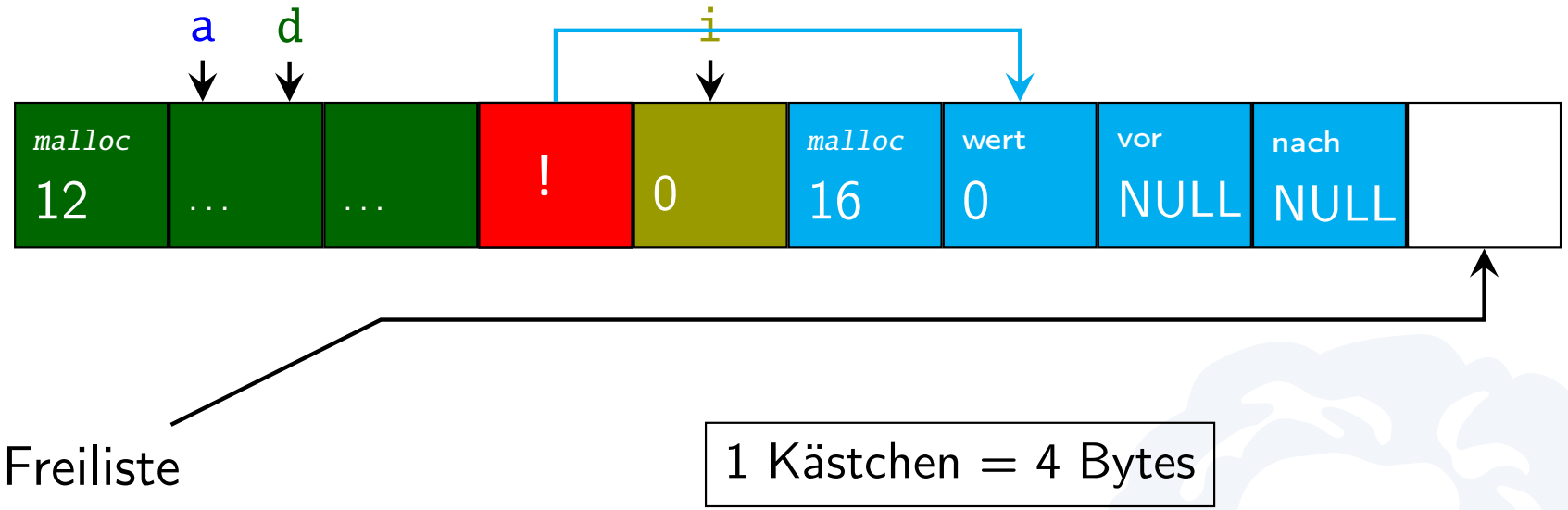

```
⇒knoten_t *a = calloc(1,sizeof(knoten_t));
⇒free(a);
⇒double *d = calloc(1,sizeof(double));
  int *i = calloc(1,sizeof(int));
  a->nach = calloc(1,sizeof(knoten_t));
```

Speicherkorruption




```
knoten_t *a = calloc(1,sizeof(knoten_t));
free(a);
⇒double *d = calloc(1,sizeof(double));
⇒int *i = calloc(1,sizeof(int));
⇒a->nach = calloc(1,sizeof(knoten_t));
```

Speicherkorruption

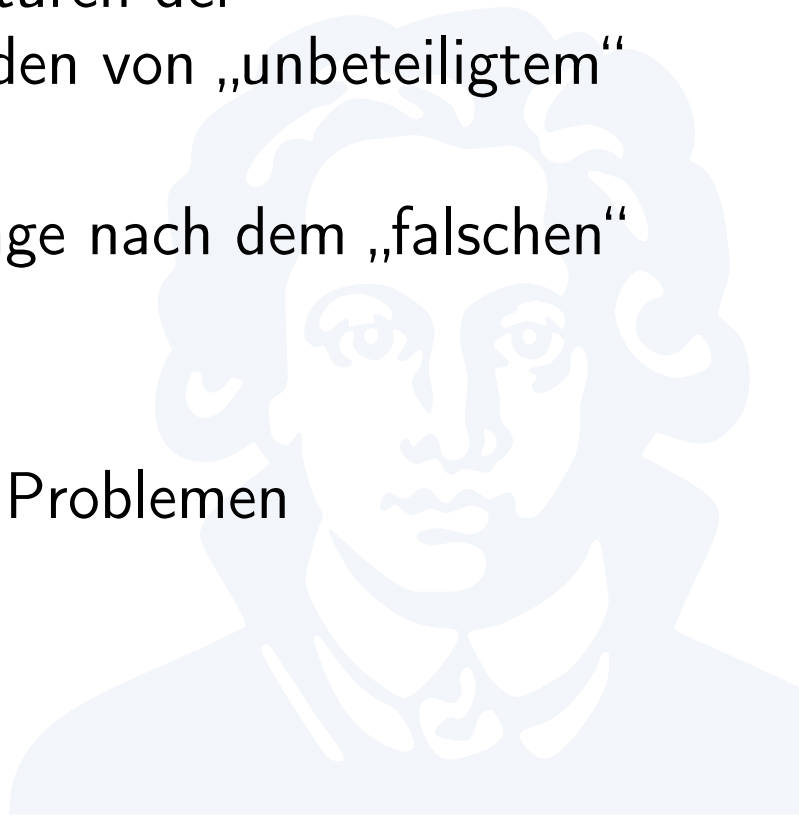



```
knoten_t *a = calloc(1,sizeof(knoten_t));
free(a);
double *d = calloc(1,sizeof(double));
int *i = calloc(1,sizeof(int));
a->nach = calloc(1,sizeof(knoten_t));
```

Speicherkorruption: Speicherinhalt beschädigt

Speicherkorruption

- Speicherkorruption:
  Speicherinhalte oder Kontrollstrukturen der Speicherverwaltung (`malloc`) werden von „unbeteiligtem“ Code beschädigt
- Sichtbare Fehler treten oft erst lange nach dem „falschen“ Speicherzugriff auf
- *Sehr schwer* zu diagnostizieren
- Manifestiert sich meist in anderen Problemen



Zusammenfassung: Speicherfehler

- Entstehen durch Verletzung eines 'Vertrages':
  - Genau ein `free` pro `malloc`
  - `free`, wenn Speicher nicht mehr nötig
  - Keine Dereferenzierung von „hängenden Zeigern“
  - Zeigerarithmetik nur mit Vorsicht

Fehler	**Ablage**	**Stapel**	**Statisch**
Doppel-`free()`	*möglich*	nicht möglich	nicht möglich
Deallozierung vergessen	*möglich*	nicht möglich	nicht möglich
Hängender Zeiger	*möglich*	*möglich*	nicht möglich
Zeigerarithmetik-Fehler	*möglich*	*möglich*	*möglich*

Speicherfehler sind in allen Speicherformen möglich

Nächste Woche:

Der Präprozessor cpp
Das C-Modulsystem
Systembibliotheken