

# Übungen zu Systemprogrammierung 1

## Ü5 – Freispeicherverwaltung

---

Sommersemester 2024

Luis Gerhorst, Thomas Preisner, Jürgen Kleinöder

Lehrstuhl für Informatik 4  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



Lehrstuhl für Verteilte Systeme  
und Betriebssysteme



FRIEDRICH-ALEXANDER  
UNIVERSITÄT  
ERLANGEN-NÜRNBERG

TECHNISCHE FAKULTÄT



4.1 gdb

4.2 Freispeicherverwaltung

4.3 Implementierung

4.4 Aufgabe 5: halde

4.5 Gelerntes anwenden



4.1 gdb

4.2 Freispeicherverwaltung

4.3 Implementierung

4.4 Aufgabe 5: halde

4.5 Gelerntes anwenden



- Ein Debugger dient zum Suchen und Finden von Fehlern in Programmen
- Im Debugger kann man u.a.
  - das Programm schrittweise abarbeiten
  - Variablen- und Speicherinhalte ansehen und modifizieren
  - core dumps (Speicherabbilder beim Programmabsturz) analysieren
- Das zu analysierende Programm sollte mit folgenden Optionen übersetzt werden
  - -g, damit es Debug-Symbole enthält
  - -O0, um Übersetzeroptimierungen auszuschalten (kann das Laufzeitverhalten beeinflussen)
- Aufruf des Basis-Debuggers mit `gdb <Programmname>`
- Inklusive Visualisierung des Quelltextes: `cgdb <Programmname>`



```
/* Mit folgenden Übersetzeroptionen kompilieren:  
* -O0 -g  
*/  
#include <stdio.h>  
  
static void initArray(long *array, size_t size) {  
    for (size_t i = 0; i <= size; i++) {  
        array[i] = 0;  
    }  
}  
  
int main(void) {  
    long *array;  
    long buf[7];  
  
    array = buf;  
    initArray(buf, sizeof(buf)/sizeof(long));  
  
    while (array != buf+sizeof(buf)/sizeof(long)) {  
        printf("%ld\n", *array);  
        array++;  
    }  
}
```



- Programmausführung beeinflussen
  - Breakpoints setzen:
    - **break** [<Dateiname>:]<Funktionsname> [if <Bedingung>]
    - **break** [<Dateiname>:]<Zeilennummer> [if <Bedingung>]
  - Starten des Programms mit **run** (+ evtl. Befehlszeilenparameter)
  - An laufendes Programm anhängen mit **attach** <pid>
  - Fortsetzen der Ausführung bis zum nächsten Stop mit **continue**
  - schrittweise Abarbeitung auf Ebene der Quellsprache mit
    - **step** (läuft in Funktionen hinein)
    - **next** (behandelt Funktionsaufrufe als einzelne Anweisung)
    - **finish** (beendet aktuelle Funktion/Schleife/etc.)
  - Breakpoints anzeigen: **info breakpoints**
  - Breakpoint löschen: **delete breakpoint#**



- Variableninhalte anzeigen/modifizieren
  - Anzeigen von Variablen mit: `print (type) expr`
    - `expr` ist ein C-Ausdruck, im einfachsten Fall der Name einer Variable
    - Typecasts sind über `type` möglich
  - Automatische Anzeige von Variablen bei jedem Programmstopp (Breakpoint, Step, ...): `display expr`
  - Setzen von Variablenwerten mit `set <variablenname>=<wert>`
- Ausgabe des Funktionsaufruf-Stacks (backtrace): `backtrace`
- Quellcode an aktueller Position anzeigen: `list`
- Watchpoints: Stoppt Ausführung bei Zugriff auf eine bestimmte Variable
  - `watch expr`: Stoppt, wenn sich der Wert des C-Ausdrucks `expr` ändert
  - `rwatch expr`: Stoppt, wenn `expr` gelesen wird
  - `awatch expr`: Stopp bei jedem Zugriff (kombiniert `watch` und `rwatch`)
  - Anzeigen und Löschen analog zu den Breakpoints



4.1 gdb

4.2 Freispeicherverwaltung

4.3 Implementierung

4.4 Aufgabe 5: halde

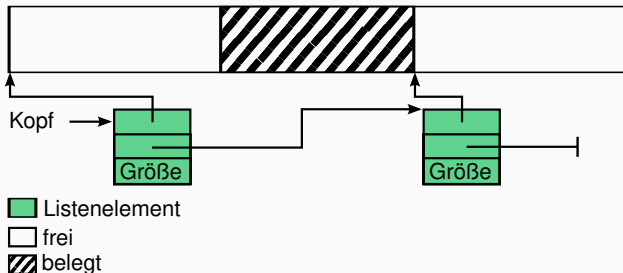
4.5 Gelerntes anwenden





- Anforderung von Speicher: `void *malloc(size_t size);`
  - Parameter: Größe des angeforderten Speichers
  - Rückgabewert: Zeiger auf einen Speicherbereich
- **Explizite** Freigabe: `void free(void *ptr);`
  - Parameter: Zeiger auf freizugebenden Speicherbereich
  - Rückgabewert: –

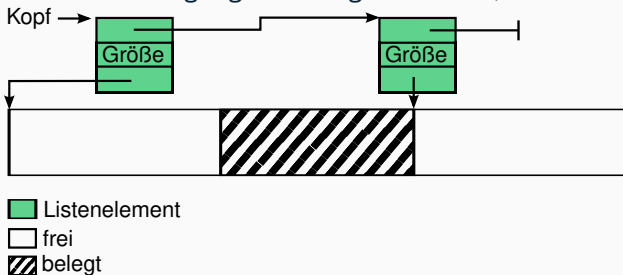
- Ziel: Speicherbereiche, die zur Laufzeit in beliebiger Größe angefordert werden können
- Skizze: Zustand eines teilweise belegten Heaps



- Welche Informationen muss eine Freispeicherverwaltung bereit halten?
  - für freie Blöcke: Größe und Lage des Speicherbereichs
  - für belegte Blöcke: Größe des Speicherbereichs
- Welche Datenstruktur ist für eine Freispeicherverwaltung geeignet?
  - KISS (Keep it small and simple): einfach verkettete Liste

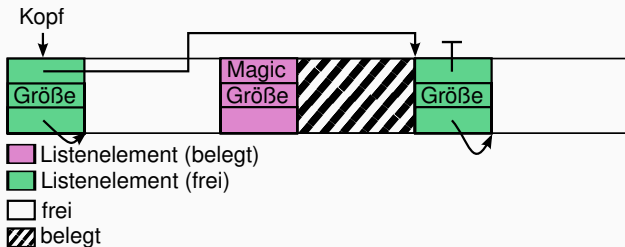


- Konzept einer Freispeicherverwaltung auf Basis einer verketteten Liste (ohne Berücksichtigung der belegten Blöcke!)



- Freie Blöcke werden in einer verketteten Liste gespeichert
- Wie wird eine verkettete Liste in C implementiert? (→ Übung 1)  
`insertVal() → malloc() → insertVal() → malloc() →`  
`insertVal() → malloc() → insertVal() → malloc() →`  
`insertVal() → malloc() → insertVal() → malloc() →`  
`insertVal() → ...`

- Woher den Speicher für die Listenelemente nehmen?



- Block an verwaltetem Speicher
- Verwaltungs-Listenelemente am Anfang des jew. Speicherbereichs
- auch in belegten Blöcken vorhanden, aber nicht verkettet
  - ⇒ Realisierung eines Schutzmechanismus:
    - Abspeichern eines (wohldefinierten) magischen Wertes in Verweis auf nächstes Listenelement
    - Überprüfung dieses Wertes vor Freigabe des Speicherblocks



4.1 gdb

4.2 Freispeicherverwaltung

**4.3 Implementierung**

4.4 Aufgabe 5: halde

4.5 Gelerntes anwenden



## ■ Listenelementdefinition in C

```
struct mblock {  
    struct mblock *next; // Zeiger zur Verkettung  
    size_t size;        // Größe des Speicherbereichs  
    char mem_area[];    // Anfang des Speicherbereichs  
};
```

## ■ Verwendung von FAM (Flexible Array Member):

- mem\_area ist **ein Feld beliebiger Länge**
- In unserem Fall: mem\_area ist ein konstanter „Verweis“ auf das Ende der Struktur
- mem\_area selbst hat die Größe 0



```
struct test {  
    uint64_t num; // 8 Byte  
    void *ptr; // 8 Byte (auf amd64)  
}
```

```
struct test *arr .....  
    &arr[0] - - - - -  
    &arr[2] - - - - -  
    arr + 3 - - - - -  
    ((uint64_t*) arr) + 7 - - - - -  
    ((char*) arr) + 7 - - - - -  
    &(5[arr]) - - - - -  
    &(5[5]) ⚡ - - - - -  
    (void*) arr - - - - -  
    ((void*) arr) + 4 ⚡ - - - - -
```

6	ptr = ●
	num = 9
5	ptr = ●
	num = 8
4	ptr = ●
	num = 7
3	ptr = ●
	num = 6
2	ptr = ●
	num = 5
1	ptr = ●
	num = 4
0	ptr = ●
	num = 3



- Schrittweises Abarbeiten des folgenden Codestückes:

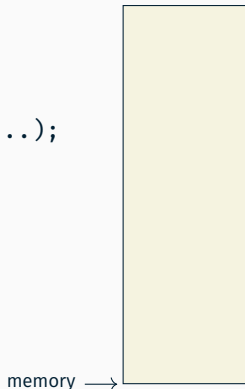
```
char *m1 = (char *)malloc(10);  
char *m2 = (char *)malloc(20);  
free(m2);
```

- Annahmen:
  - Freispeicherverwaltung verwaltet 100 Byte an Speicher
  - Verwendung von absoluten Größen (Annahme: 64-Bit-Architektur)
    - Größe eines Zeigers: 8 Bytes
    - Größe der `struct mblock`: 16 Bytes



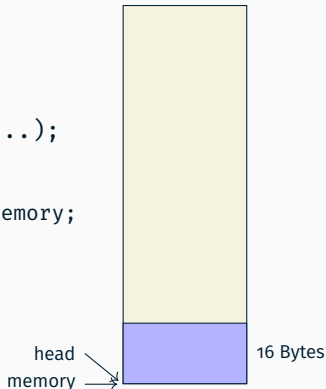


- Speicher vom Betriebssystem anfordern:
  - durch statische Allokation zur Ladezeit:  
`char memory[100];`
  - durch Systemaufruf zur Laufzeit:  
`char *memory = mmap(NULL, 100, ...);`





- Speicher vom Betriebssystem anfordern:
  - durch statische Allokation zur Ladezeit:  
`char memory[100];`
  - durch Systemaufruf zur Laufzeit:  
`char *memory = mmap(NULL, 100, ...);`
- `struct mblock` reinlegen:  
`struct mblock *head = (struct mblock *)memory;`

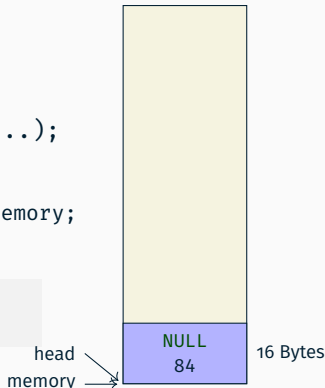




- Speicher vom Betriebssystem anfordern:
  - durch statische Allokation zur Ladezeit:  
`char memory[100];`
  - durch Systemaufruf zur Laufzeit:  
`char *memory = mmap(NULL, 100, ...);`
- `struct mblock` reinlegen:  
`struct mblock *head = (struct mblock *)memory;`
- `struct mblock` initialisieren:

```
head->next = NULL;  
head->size = 84;
```

- ! zwei Zeiger mit unterschiedlichem Typ auf den gleichen Speicherbereich
  - unterschiedliche Semantik beim Zugriff (Zeigerarithmetik, Strukturkomponenten)

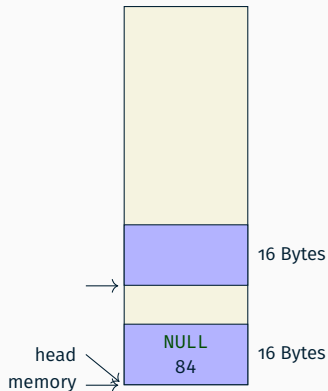




## ■ Speicheranforderung von 10 Bytes

```
char *m1 = (char *)malloc(10);
```

- Freispeicherliste nach mblock mit ausreichend Speicher durchsuchen
- 10 Bytes hinter dem head-mblock einen neuen mblock anlegen

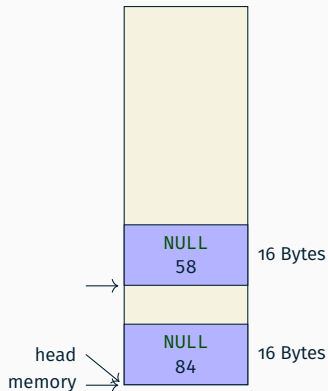




## ■ Speicheranforderung von 10 Bytes

```
char *m1 = (char *)malloc(10);
```

- Freispeicherliste nach mblock mit ausreichend Speicher durchsuchen
- 10 Bytes hinter dem head-mblock einen neuen mblock anlegen
- ... und initialisieren

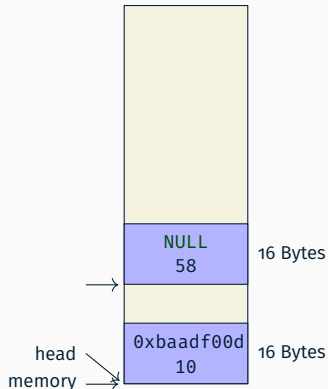




## ■ Speicheranforderung von 10 Bytes

```
char *m1 = (char *)malloc(10);
```

- Freispeicherliste nach mblock mit ausreichend Speicher durchsuchen
- 10 Bytes hinter dem head-mblock einen neuen mblock anlegen
- ... und initialisieren
- Bisherigen head-mblock anpassen
  - als belegt markieren
  - Größe des Speicherbereichs aktualisieren

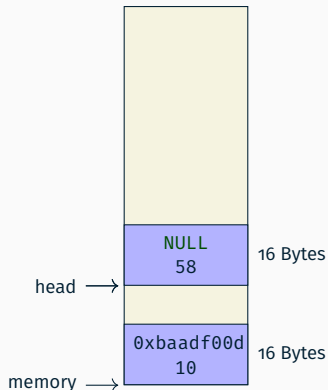




## ■ Speicheranforderung von 10 Bytes

```
char *m1 = (char *)malloc(10);
```

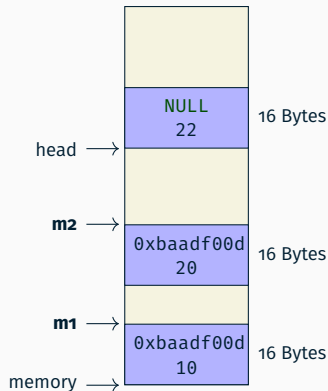
- Freispeicherliste nach mblock mit ausreichend Speicher durchsuchen
- 10 Bytes hinter dem head-mblock einen neuen mblock anlegen
- ... und initialisieren
- Bisherigen head-mblock anpassen
  - als belegt markieren
  - Größe des Speicherbereichs aktualisieren
- head-Zeiger auf neues Kopfelement setzen





## ■ Situation nach 2 malloc()-Aufrufen

```
char *m1 = (char *)malloc(10);  
char *m2 = (char *)malloc(20);
```



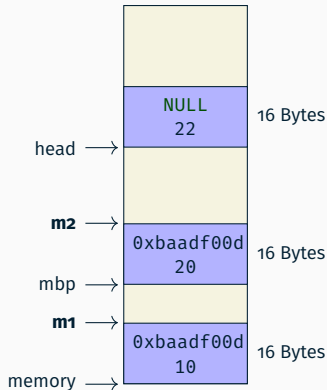




## ■ Freigabe von m2

```
free(m2);
```

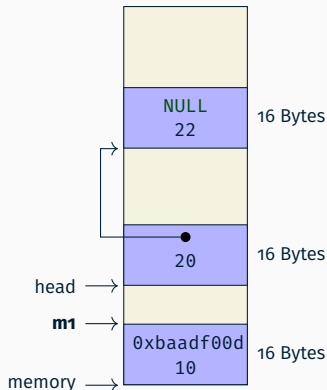
- Zeiger mbp auf zugehörigen mblock ermitteln
- Überprüfen, ob ein gültiger, belegter mblock vorliegt (0xbaadf00d)



## ■ Freigabe von m2

```
free(m2);
```

- Zeiger mbp auf zugehörigen mblock ermitteln
- Überprüfen, ob ein gültiger, belegter mblock vorliegt (0xbaadf00d)
- head auf freigegebenen mblock setzen, bisherigen head-mblock verketten





- Mit dem Systemaufruf `mmap(2)` kann ein Programm seinen virtuellen/logischen Adressraum zur Laufzeit erweitern lassen:

```
#include <sys/mman.h>

void *mmap(void *addr, size_t length, int prot,
           int flags, int fd, off_t offset);
```

- Beliebige freie Startadresse: `addr = NULL;`
- Les- und schreibbar, aber nicht ausführbar:  
`prot = PROT_READ | PROT_WRITE; // nicht PROT_EXECUTE`
- Speicher soll nicht mit anderen Prozessen geteilt werden:  
`flags = MAP_PRIVATE | MAP_ANONYMOUS;`  
`fd = -1;`  
`offset = 0;`
- Rückgabewert ist `MAP_FAILED` oder gültige Speicheradresse



- Mit dem Systemaufruf `mmap(2)` kann ein Programm seinen virtuellen/logischen Adressraum zur Laufzeit erweitern lassen:

```
#include <sys/mman.h>

void *mmap(NULL, size_t length, PROT_READ | PROT_WRITE,
           MAP_PRIVATE | MAP_ANONYMOUS, -1, 0);
```



- Mit dem Systemaufruf `mmap(2)` kann ein Programm seinen virtuellen/logischen Adressraum zur Laufzeit erweitern lassen:

```
#include <sys/mman.h>

void *mmap(NULL, size_t length, PROT_READ | PROT_WRITE,
           MAP_PRIVATE | MAP_ANONYMOUS, -1, 0);
```

- Mit diesen Parametern funktional vergleichbar mit `malloc(3p)`
  - aber *noch* langsamer
  - nur zum grobgranularen An-/Nachfordern geeignet  
vgl. Vorlesung B VI.2/20



- Mit dem Systemaufruf `mmap(2)` kann ein Programm seinen virtuellen/logischen Adressraum zur Laufzeit erweitern lassen:

```
#include <sys/mman.h>

void *mmap(NULL, size_t length, PROT_READ | PROT_WRITE,
           MAP_PRIVATE | MAP_ANONYMOUS, -1, 0);
```

- Mit diesen Parametern funktional vergleichbar mit `malloc(3p)`
  - aber *noch* langsamer
  - nur zum grobgranularen An-/Nachfordern geeignet  
vgl. Vorlesung B VI.2/20

## MAP\_ANONYMOUS nicht in POSIX-1.2008, sondern Linux-spezifisch

- In dieser Aufgabe ausnahmsweise `-D_GNU_SOURCE` statt `-D_XOPEN_SOURCE=700`
- POSIX kann nicht basierend auf POSIX implementiert werden



- sehr einfache Implementierung – in der Praxis problematisch
  - Speicher wird im Laufe der Zeit stark fragmentiert
    - Suche nach passender Lücke dauert zunehmend länger
    - eventuell keine passende Lücke mehr vorhanden, obwohl insgesamt genug Speicher frei ist
  - in der Praxis: Verschmelzung benachbarter Freispeicherblöcke
- kein nachträgliches Vergrößern des Heaps
  - in der Praxis: erneut Speicher vom Betriebssystem nachfordern
- langsame Suche nach freiem Speicherbereich passender Größe
  - in der Praxis: Gruppierung der freien Speicherbereiche (Buckets)
- sinnvolle Implementierung erfordert geeignete Speichervergabestrategie
  - Implementierung erheblich aufwändiger – Resultat aber entsprechend effizienter
  - Strategien werden im Abschnitt Speicherverwaltung in SP2 behandelt (z. B. First-Fit, Best-Fit, Worst-Fit oder Buddy-Verfahren)



4.1 gdb

4.2 Freispeicherverwaltung

4.3 Implementierung

**4.4 Aufgabe 5: halde**

4.5 Gelerntes anwenden





## ■ Ziele der Aufgabe

- Zusammenhang zwischen „nacktem Speicher“ und typisierten Datenbereichen verstehen
- Funktion aus der C-Bibliothek / POSIX selbst realisieren
- Entwickeln eigener Testfälle für selbstgeschriebenen Code

## ■ Vereinfachungen

- First-Fit-ähnliche Allokationsstrategie
- 1 MiB Speicher nur einmal bei der Initialisierung vom Betriebssystem Anfordern
- freier Speicher wird in einer einfach verketteten Liste (unsortiert) verwaltet
- benachbarte freie Blöcke werden nicht verschmolzen
- `realloc` wird grundsätzlich auf `malloc`, `memcpy` und `free` abgebildet



4.1 gdb

4.2 Freispeicherverwaltung

4.3 Implementierung

4.4 Aufgabe 5: halde

**4.5 Gelerntes anwenden**

Skizzieren Sie den Aufbau des verwalteten Speicherbereichs (hier: 64 Bytes, `sizeof(struct mblock) = 16 Bytes`) nach jedem Schritt des jeweiligen Szenarios

1.

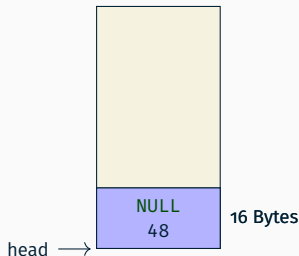
```
char *c1 = (char *)malloc(5);  
char *c2 = (char *)malloc(7);  
free(c1);
```

2.

```
char *c1 = (char *)malloc(20);  
free(c1);  
char *c2 = (char *)malloc(4);
```

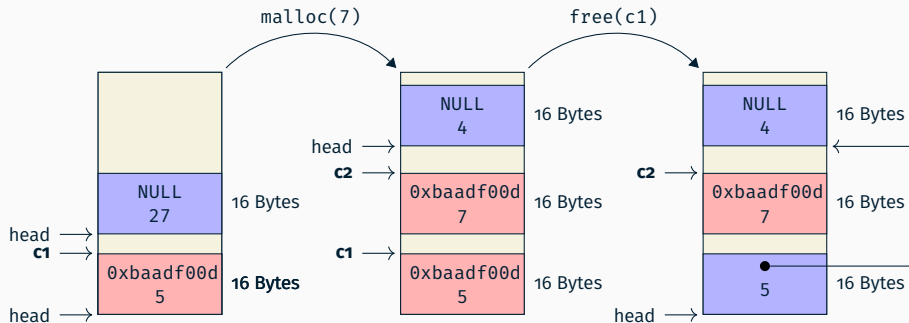
3.

```
char *c1 = (char *)malloc(18);  
char *c2 = (char *)malloc(14);  
free(c1);
```



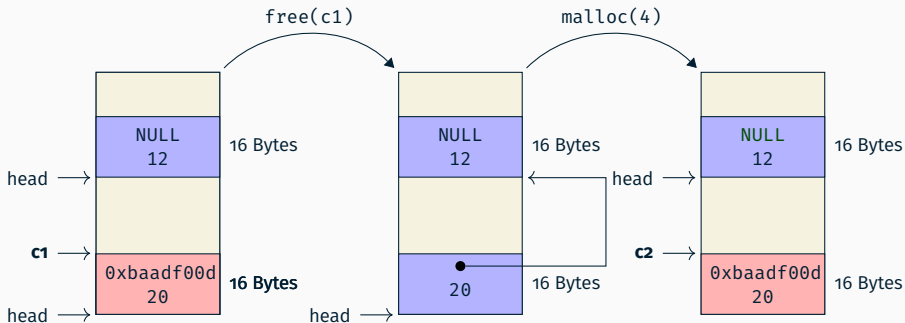
## ■ Szenario 1:

```
char *c1 = (char *)malloc(5);  
char *c2 = (char *)malloc(7);  
free(c1);
```



## ■ Szenario 2:

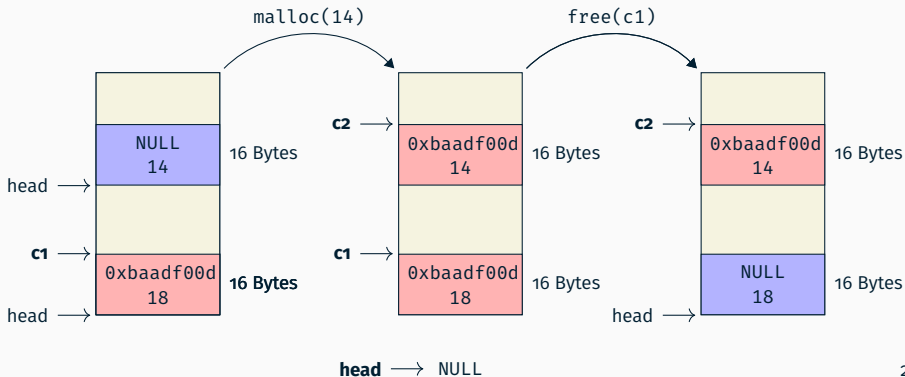
```
char *c1 = (char *)malloc(20);  
free(c1);  
char *c2 = (char *)malloc(4);
```





## ■ Szenario 3:

```
char *c1 = (char *)malloc(18);  
char *c2 = (char *)malloc(14);  
free(c1);
```



## German Collegiate Programming Contest 2024

Samstag, 22.06.2024, 11-16 Uhr

- ICPC - Dreistufiger Wettbewerb mit Local Contest in Erlangen (GCPC), Regional Contest (Delft, Niederlande) und World Finals (Ägypten in 2023)
- Einzel oder in Teams bis 3 Studis innerhalb von 5 Stunden ungefähr 13 knifflige und originelle Programmieraufgaben lösen
- Für Pizza wird gesorgt 🍕
- Weitere Infos und Anmeldung:

<https://gcpc.nwerc.eu/>

- Anmeldeschluss und Practice Session am 20.06 (Donnerstag)





### German Collegiate Programming Contest Programmierwettbewerb an der FAU 22.06.2024 – 11 bis 16 Uhr

#### 01.155 CIP–Pool Informatik (CIP1)



Falling in love is great, but...

have you ever fixed a bug?



**Practice Session**  
 Donnerstag, 20.06  
 Bib–CIP (02.135–113)  
 18:00–20:00

**1 Computer, 3 Studis, ~10 Problems  
 + free Pizza**

Anmeldung bis 20.06, 23:59 CEST

**Infos und Anmeldung:** <https://gcpc.nwerc.eu/>



