Übungen zu Betriebssysteme

Ü7 – Freispeicherverwaltung & Aufgabe: halde

Sommersemester 2023

Henriette Hofmeier, Manuel Vögele, Benedict Herzog, Timo Hönig

Bochum Operating Systems and System Software Group (BOSS)

Faculty of Computer Science

RUHR UNIVERSITÄT BOCHUM

RUB

Agenda

7.1 Freispeicherverwaltung

7.2 Implementierung

7.3 gdb

7.4 Aufgabe: halde

7.5 Gelerntes anwenden

Agenda

Dynamische Speicherverwaltung (in C)

- 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: –

Initialisierung

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

Initialisierung

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

  - Welche Informationen muss eine Freispeicherverwaltung bereit halten?

Initialisierung

- 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

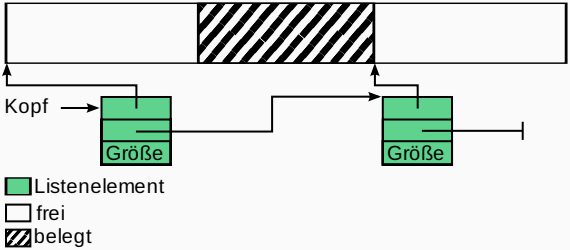
Initialisierung

- 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?

Initialisierung

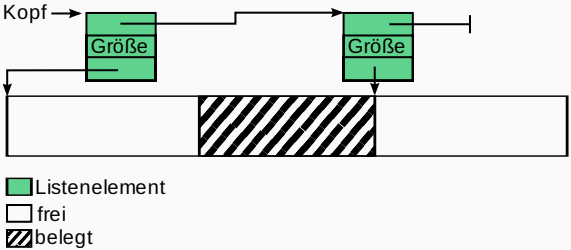
- Ziel: Speicherbereiche, die zur Laufzeit in beliebiger Größe angefordert werden können
- Skizze: Zustand eines teilweise belegten Heaps



  - 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: Verkettete Liste zur Allokation

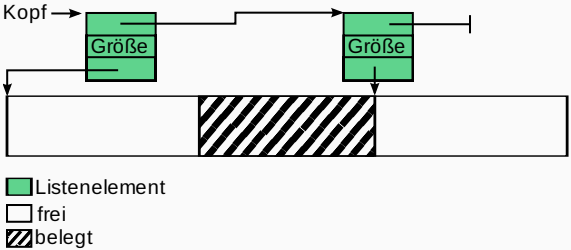
- Konzept einer Freispeicherverwaltung auf Basis einer verketteten Liste (ohne Berücksichtigung der belegten Blöcke!)



  - Freie Blöcke werden in einer verketteten Liste gespeichert

Konzept: Verkettete Liste zur Allokation

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

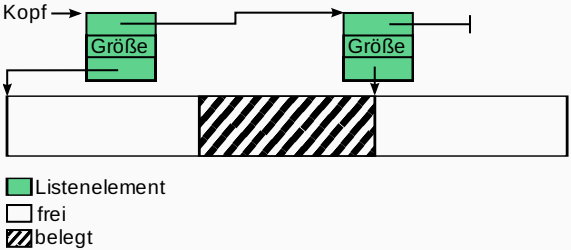


  - Freie Blöcke werden in einer verketteten Liste gespeichert

- Wie wird eine verkettete Liste in C implementiert?

Konzept: Verkettete Liste zur Allokation

- 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?

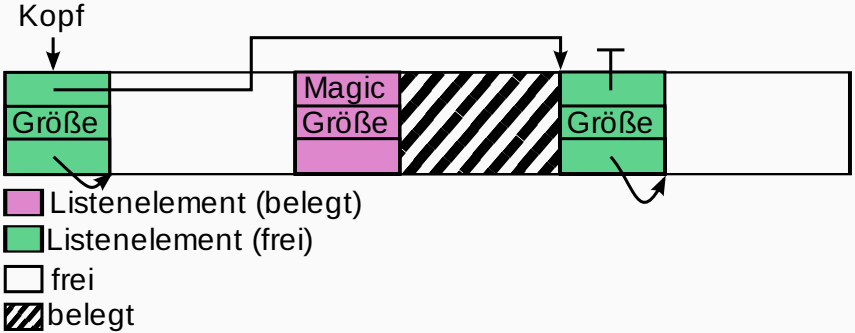
  `insertVal()` → `malloc()` → `insertVal()` → `malloc()` → `insertVal()` → `malloc()` → `insertVal()` → `malloc()` → `insertVal()` → `malloc()` → `insertVal()` → ...

Speicher für die Listenelemente

- Woher den Speicher für die Listenelemente nehmen?

Speicher für die Listenelemente

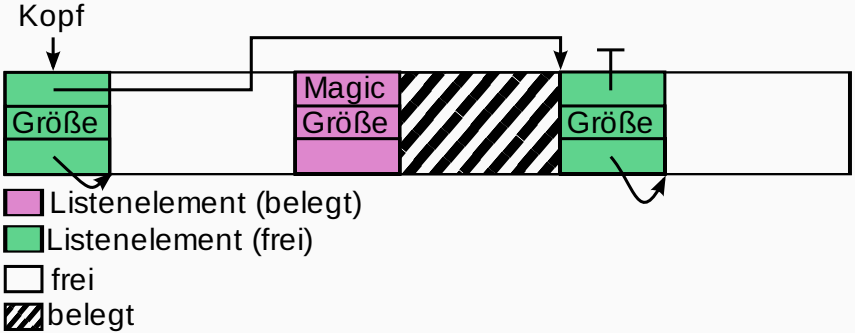
- Woher den Speicher für die Listenelemente nehmen?



  - Listenelemente werden innerhalb des verwalteten Speichers am Anfang des jeweiligen Speicherbereichs abgelegt

Speicher für die Listenelemente

- Woher den Speicher für die Listenelemente nehmen?



  - Listenelemente werden innerhalb des verwalteten Speichers am Anfang des jeweiligen Speicherbereichs abgelegt
  - Listenelemente auch in belegten Blöcken vorhanden, aber nicht verkettet
    - Verweis auf nächstes Listenelement wird zur Realisierung eines Schutzmechanismus eingesetzt
    - Abspeichern eines wohldefinierten magischen Wertes und Überprüfung des Wertes vor dem Freigeben

Agenda

Implementierung

- 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`

Beispiel auf den Folien

- Schrittweises Abarbeiten des folgenden Codestückes:

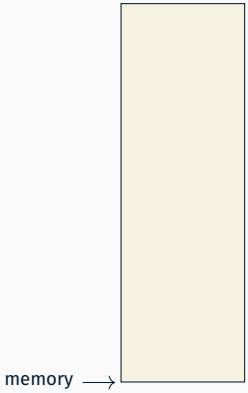
```
char *m1 = (char *)malloc(10);
char *m2 = (char *)malloc(20);

free(m2);
```

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

Initialisierung

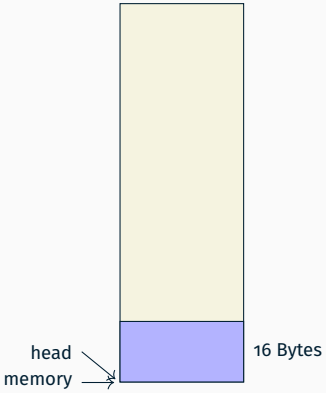
- Speicher statisch alloziert `static char memory[100];`



Initialisierung

- Speicher statisch alloziert `static char memory[100];`
- `struct mblock` reinlegen

```
struct mblock *head = (struct mblock *)memory;
```



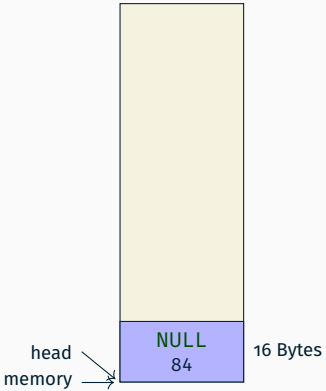
Initialisierung

- Speicher statisch alloziert `static char memory[100];`
- `struct mblock` reinlegen

```
struct mblock *head = (struct mblock *)memory;
```

- `struct mblock` initialisieren

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



Initialisierung

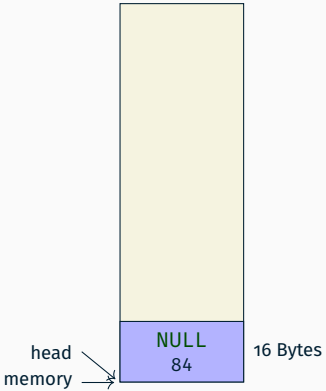
- Speicher statisch alloziert `static char memory[100];`
- `struct mblock` reinlegen

```
struct mblock *head = (struct mblock *)memory;
```

- `struct mblock` initialisieren

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

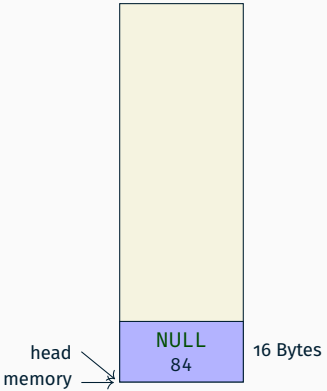
! zwei Zeiger mit unterschiedlichem Typ
auf den gleichen Speicherbereich
  - unterschiedliche Semantik beim Zugriff (Zeigerarithmetik, Strukturkomponenten)



Speicheranforderung im Detail

- Speicheranforderung von 10 Bytes

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

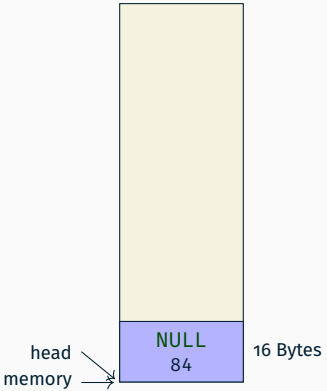


Speicheranforderung im Detail

- Speicheranforderung von 10 Bytes

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

  - Freispeicherliste nach mblock mit ausreichend Speicher durchsuchen

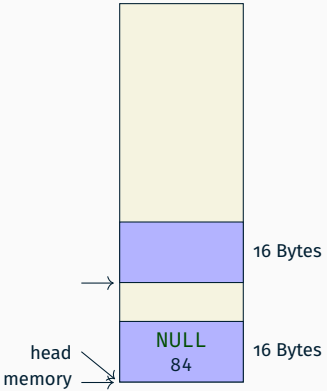


Speicheranforderung im Detail

- 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

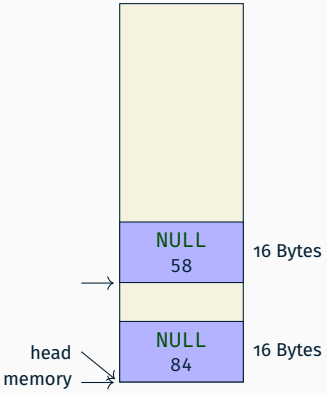


Speicheranforderung im Detail

- 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

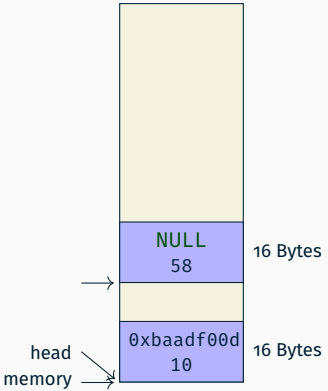


Speicheranforderung im Detail

- 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

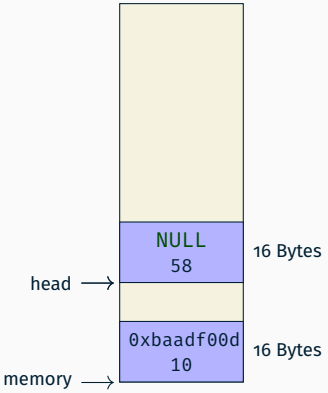


Speicheranforderung im Detail

- 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

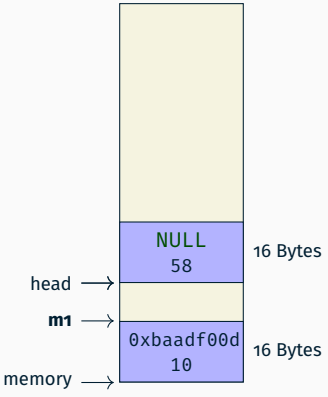


Speicheranforderung im Detail

- Speicheranforderung von 10 Bytes

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

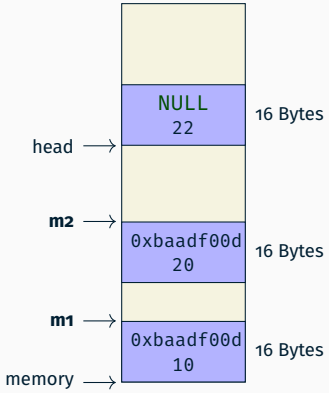
  - Freispeicherliste nach mblock mit ausreichend Speicher durchsuchen
  - 10 Bytes hinter dem head-mblock einen neuen mblock anlegen
  - ... und initialisieren
  - Bisherigen `head-mblock` anpassen
    - als belegt markieren
    - Größe des Speicherbereichs aktualisieren
  - head-Zeiger auf neues Kopfelement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



Speicheranforderung im Detail

- Situation nach 2 `malloc()`-Aufrufen

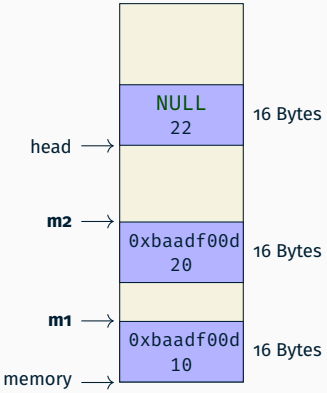
```
char *m1 = (char *)malloc(10);
char *m2 = (char *)malloc(20);
```



Speicherfreigabe

- Freigabe von m2

```
free(m2);
```

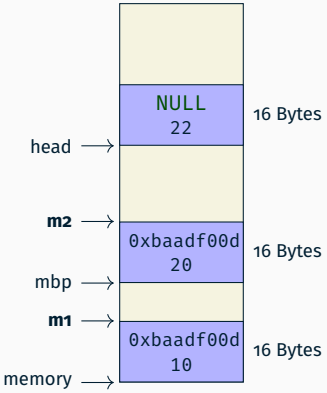


Speicherfreigabe

- Freigabe von m2

```
free(m2);
```

  - Zeiger mbp auf zugehörigen mblock ermitteln

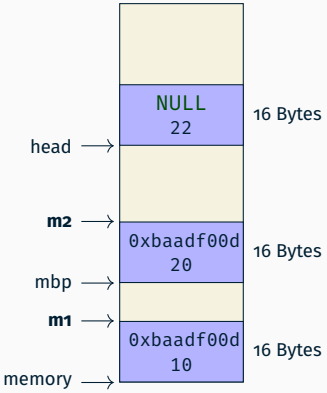


Speicherfreigabe

- Freigabe von `m2`

```
free(m2);
```

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

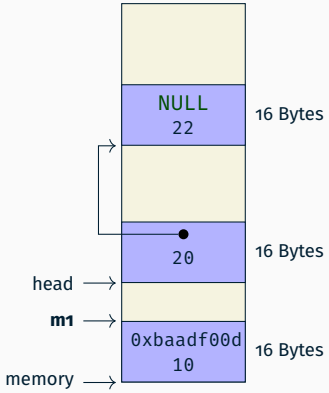


Speicherfreigabe

- 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



Zusammenfassung

- 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

Zusammenfassung

- 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: Speicherseiten vom Betriebssystem nachfordern
- langsame Suche nach freiem Speicherbereich passender Größe
  - in der Praxis: Gruppierung der freien Speicherbereiche (Buckets)

Zusammenfassung

- 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: Speicherseiten 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 in der Vorlesung *Memory Management* behandelt (z. B. First-Fit, Best-Fit, Worst-Fit oder Buddy-Verfahren)

Agenda

Debugger: gdb

- Ein Debugger dient zum Suchen und Finden von Fehlern in Programmen

Debugger: gdb

- 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

Debugger: gdb

- 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
    - Erlauben von core dumps (in der laufenden Shell): z. B. `limit coredumpsize 1024k` oder `limit coredumpsize unlimited`

Debugger: gdb

- 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
    - Erlauben von core dumps (in der laufenden Shell): z. B. `limit coredumpsize 1024k` oder `limit coredumpsize unlimited`
- Das zu analysierende Programm sollte mit folgenden Optionen übersetzt werden
  - `-g`, damit es Debug-Symbole enthält
  - `-O0`, um Übersetzeroptimierungen auszuschalten (kann das Laufzeitverhalten beeinflussen)

Debugger: gdb

- 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
    - Erlauben von core dumps (in der laufenden Shell): z. B. `limit coredumpsize 1024k` oder `limit coredumpsize unlimited`
- 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>`

Demo

```c
/* 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++;
  }
}
```

Befehlsübersicht

- Programmausführung beeinflussen
  - Breakpoints setzen:
    - `b [<Dateiname>:]<Funktionsname>`
    - `b <Dateiname>:<Zeilennummer>`
  - Starten des Programms mit `run` (+ evtl. Befehlszeilenparameter)
  - Fortsetzen der Ausführung bis zum nächsten Stop mit `c` (continue)
  - schrittweise Abarbeitung auf Ebene der Quellsprache mit
    - `s` (step: läuft in Funktionen hinein)
    - `n` (next: behandelt Funktionsaufrufe als einzelne Anweisung)
  - Breakpoints anzeigen: `info breakpoints`
  - Breakpoint löschen: `delete breakpoint#`

Befehlsübersicht

- Variableninhalte anzeigen/modifizieren
  - Anzeigen von Variablen mit: `p expr`
    - `expr` ist ein C-Ausdruck, im einfachsten Fall der Name einer Variable
  - Automatische Anzeige von Variablen bei jedem Programmstopp (Breakpoint, Step, ...): `display expr`
  - Setzen von Variablenwerten mit `set <variablenname>=<wert>`
- Ausgabe des Funktionsaufruf-Stacks (backtrace): `bt`
- 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

Agenda

Ziele der Aufgabe

- Ziele der Aufgabe
  - Zusammenhang zwischen „nacktem Speicher” und typisierten Datenbereichen verstehen
  - Funktion aus der C-Bibliothek selbst realisieren
  - Entwickeln eigener Testfälle für selbstgeschriebenen Code
  - Umgang mit `make(1)`
- Vereinfachungen
  - First-Fit-ähnliche Allokationsstrategie
  - 1 MiB Speicher statisch alloziert
  - 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

Agenda

Aktive Mitarbeit!

„Aufgabenstellung“

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

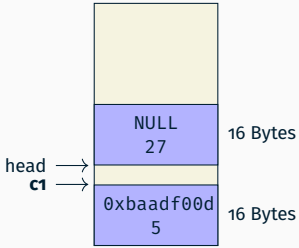
  - Szenario 3:

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

Lösung zu den Aufgaben

- Szenario 1:

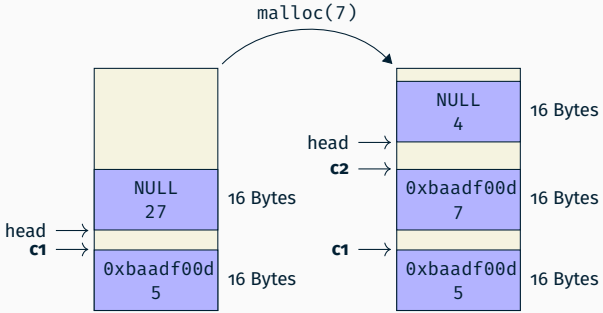
```
char *c1 = (char *)malloc(5);
char *c2 = (char *)malloc(7);
free(c1);
```



Lösung zu den Aufgaben

- Szenario 1:

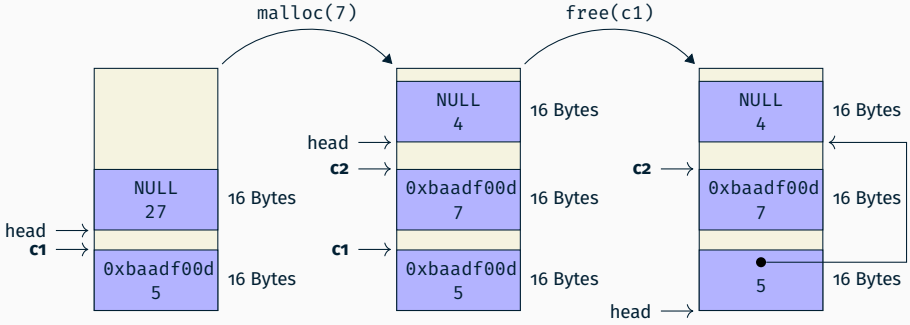
```
char *c1 = (char *)malloc(5);
char *c2 = (char *)malloc(7);
free(c1);
```



Lösung zu den Aufgaben

- Szenario 1:

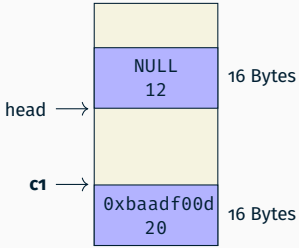
```
char *c1 = (char *)malloc(5);
char *c2 = (char *)malloc(7);
free(c1);
```



Lösung zu den Aufgaben

- Szenario 2:

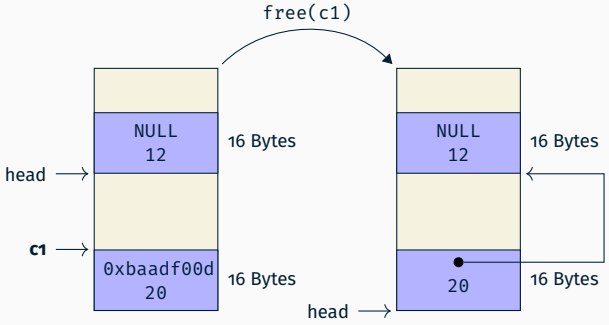
```
char *c1 = (char *)malloc(20);
free(c1);
char *c2 = (char *)malloc(4);
```



Lösung zu den Aufgaben

- Szenario 2:

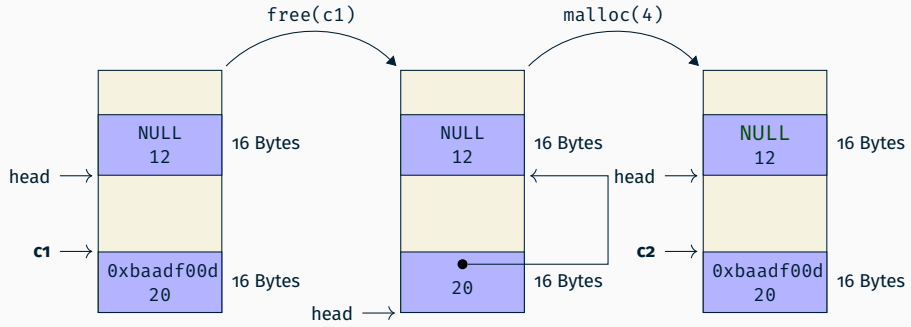
```
char *c1 = (char *)malloc(20);
free(c1);
char *c2 = (char *)malloc(4);
```



Lösung zu den Aufgaben

- Szenario 2:

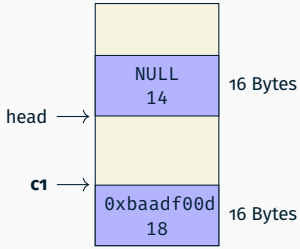
```
char *c1 = (char *)malloc(20);
free(c1);
char *c2 = (char *)malloc(4);
```



Lösung zu den Aufgaben

- Szenario 3:

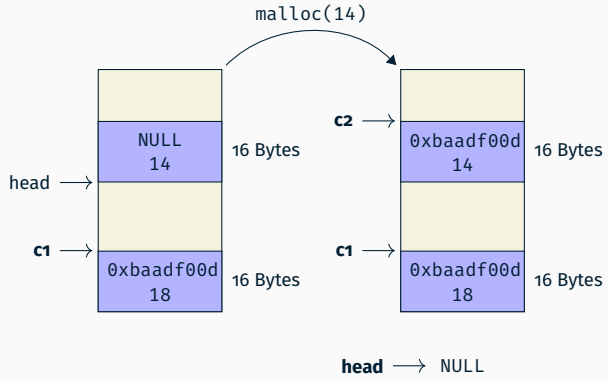
```
char *c1 = (char *)malloc(18);
char *c2 = (char *)malloc(14);
free(c1);
```



Lösung zu den Aufgaben

- Szenario 3:

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



Lösung zu den Aufgaben

- Szenario 3:

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