

# Debugging und Stack

Damien Foucard | Open Distributed Systems | Einführung in die Programmierung, WS 24/25

---

# Rückblick

VL 0 „Organisation und Inhalt“: Ablauf der Vorlesung, Termine

VL 1 „Hello World“: „Lebenswichtiges“, Programtablauf, Programmierablauf, Kompilierung und Ausführung von Programmen

VL 2 „Die ersten Schritte“: Erstes C-Programm, Elementare C-Strukturen, Datentypen, Operatoren, Schleifen

VL 3 „Kontrollstrukturen & Funktionen“: Syntax, Semantik, bedingte Anweisungen, Blöcke, Sichtbarkeit

VL 4 „Rekursive Funktionen & Bibliotheken“: rekursive Funktionsaufrufe, Modularisierung

VL 5 „Typen“: Einfache und strukturierte Datentypen, Wertebereiche, Typendefinition

VL 6 „Speicher und Adressen“: Speicher, Pointer, Funktionsaufrufe „call by value“ vs. „call by reference“

VL 7 „Speicher und Arrays“: Speicher, Arrays, mehrdimensionale Arrays, Arrays und Pointer

VL 8 „Dynamische Speicherverwaltung“: Speicherallokation, Fehlerbehandlung, Rückgabewerte, Arrays/Pointer/Adressen

VL 9 „Strings, Kanäle, Git“: Strings und Arrays, Zeichensätze, Stringlänge, Ein- und Ausgabe, Arbeiten mit git

**OPTIONAL** VL 10 „Debugging und Stack“: Fehlverhalten/Bugs, Fehlersuche Strategien und Werkzeuge

# Debugging

- Nötig während der Entwicklung
  - Hinweis: Code sollte Stück für Stück entwickelt, getestet und debugged werden!
- Nötig, wenn Code nicht compiliert
- Nötig, wenn Software „sich anders verhält als erwartet“
  - Ergebnis unterscheidet sich von Spezifikation
- Typischerweise wegen eines kleinen inkorrekten Codefragments (Bug)
  - Bug: Codefragment, das seiner Spezifikation nicht entspricht

- Konsequenzen von Bugs:
  - Compiler gibt Hinweise auf syntaktische/semantische Fehler
  - Programm hält mit Laufzeit Fehler (Run-time Error)
  - Programm hält nie an
  - Programm läuft vollständig, aber gibt inkorrekte Resultate
  - Programm läuft vollständig, aber gibt manchmal(?) inkorrekte Resultate

# Wiederholung: Syntaktische Fehler

- Vorgehen, wenn der Compiler syntaktische Fehler ausgibt
- Zum **ersten Fehler** gehen (wegen möglicher Folgefehler)
  - In die entsprechende Zeile im Code gehen (siehe Fehlermeldung des Compilers)
  - Fehler verstehen
  - Fehler beheben
  - Kompilieren
  - Fehler behoben?
    - Wenn ja gegebenenfalls nächsten Fehler beheben
    - Wenn nein, versuchen, Fehler zu verstehen und zu beheben...

# Debugging: Fehlerlokalisierung

- Bug: Codesegment mit nicht beabsichtigten Aktionen.

Man muss nachvollziehen:

- Was das Programm **machen sollte**
  - Was das Programm **wirklich macht**
- 
- **Problem:** Zu viel Informationen!
  - **Lösung:** Einkreisen des Problems!

# Debugging: Suchstrategie

## Ausnutzung typischer Strukturen eines Programms

- Fokus auf verdächtigen Datenstrukturen
  - Nach Initialisierung
  - An „strategischen Punkten“ während der Programmausführung
  - Am Ende des Programms
- Strategische Punkte?
  - Nach der ersten, zweiten, mittleren Iteration einer Schleife
  - Nach einem Tastendruck, der ein interaktives Programm zum Absturz bringt
  - Nach dem Punkt, an dem das Programm die letzte korrekte Ausgabe geliefert hat

# Debugging: Verstehen des Fehlers

- Vorgehen, nachdem eine fehlerhafte Stelle gefunden wurde:
  - Was ist der Zustand des Programms vor Ausführung des fehlerhaften Codes?
  - Was ist der Zustand des Programms nach der Ausführung?
  - Was ist der erwartete Zustand? (entsprechend Spezifikation)
- Was ist der **Zustand eines Programms**?
  - Namen und Werte aller aktiven Variablen
  - Z.B.  **$x = 3$** ,  **$y = 7$** , ...



# Programmzustandsuntersuchung mit `printf`

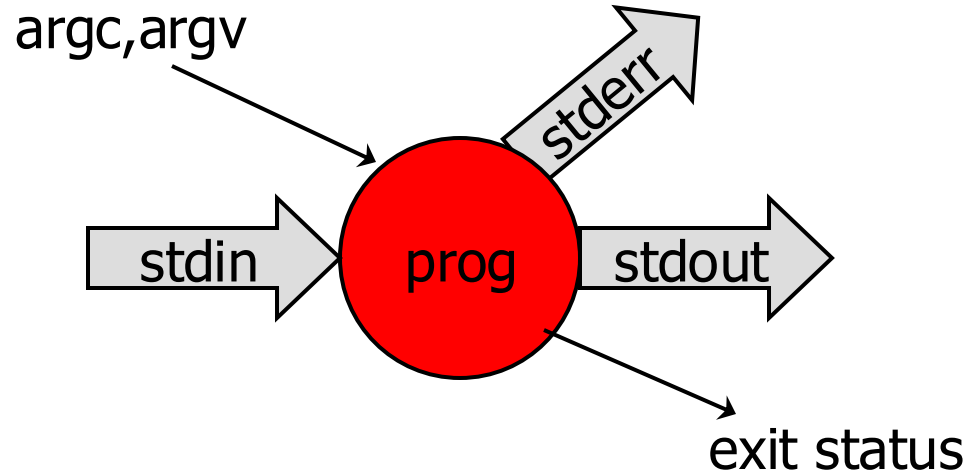
- `printf` von „suspekten“ Variablen
- Probleme:
  - Ändert das Programm
  - Raten bezüglich der suspekten Variablen
  - Ausgabe vieler Daten notwendig

# Debugger

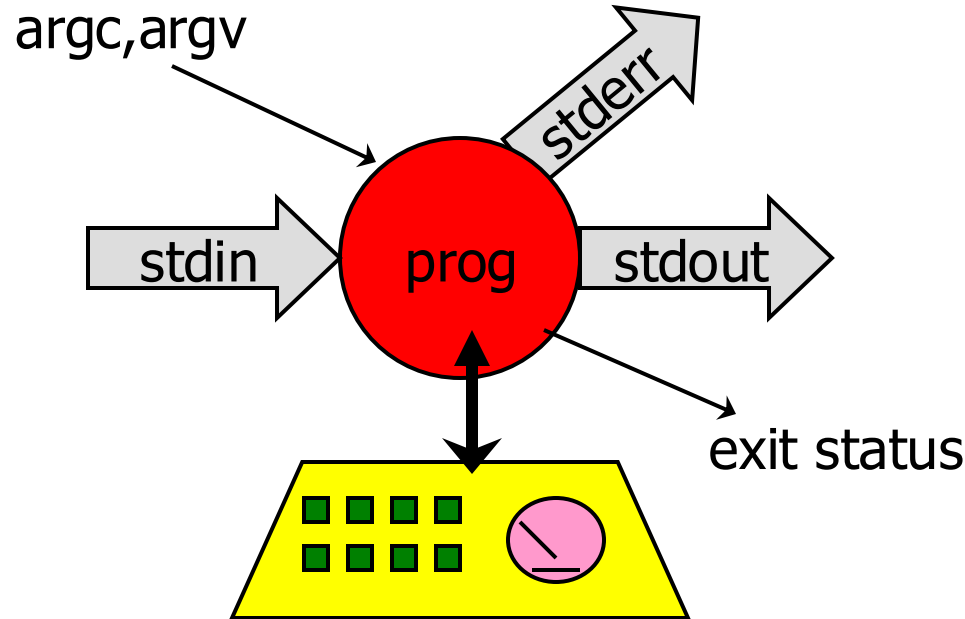
# Programmzustandsuntersuchung mit Debugger

- Debugger
  - Kann ein Programm an einem bestimmten Punkt unterbrechen
  - Kann bei Unterbrechung den Zustand des Programms anzeigen
- Zusätzlich
  - Ermöglicht, den Zustand von Programmen, die durch „Run-time“ Fehler (Laufzeitfehler) abgestürzt sind, anzuzeigen
  - Führt oft leichter zu dem Punkt, wo der Fehler auftritt

# Normale Programmausführung



# Programmausführung mit Debugger



# Debugger: Werkzeuge

- **`gdb`** und **`lldb`** sind Kommandozeilen-basierte Debugger für C, C++, ...
- Funktionalität:
  - Kontrollierte Programmausführung
  - Anzeige des Zustands des Programms
  - Zusätzlich: Änderung von Variablen, Speicher, ...

# gdb: Start

- Kompilieren mit `-g` als Argument
- Aufruf ohne core file:
  - `gdb prog`
- Aufruf mit core file:
  - `gdb prog core`
- Debugger als Shell zum Kontrollieren und Beobachten eines Programms

# gdb: Befehle #1

- `quit` – verlässt gdb
- `help [CMD]` – on-line Hilfe für Kommando CMD
- `run ARGS` – Ausführen des Programms mit Argumenten ARGS,  
z.B. aus dem Befehl  
`./prog arg1 arg2`  
wird im Debugger  
`run arg1 arg2`



# gdb: Befehle #2

- **break [PROC|LINE]** – Setzen eines Haltepunkts (breakpoint). Wenn das Programm die Funktion PROC (oder die Linie LINE) erhält, wird die Ausführung des Programms unterbrochen und die Kontrolle an **gdb** übergeben
- **next** – single step (over procedures): Ausführen des nächsten Statements. Falls das Statement ein Funktionsaufruf ist, ausführen des gesamten Funktionskörpers
- **step** – single step (into procedures): Ausführen des nächsten Statements. Falls das Statement ein Funktionsaufruf ist, halte beim ersten Statement in der Funktion

# gdb: Befehle #3

- `bt/backtrace` – gibt Aufrufkette (Stack-trace) aus
  - Mit core dump: Finden, welche Funktion das Programm ausgeführt hat, als es abgestürzt ist
  - Bei Unterbrechung: Ausgabe der Aufrufkette

# Exkurs: Aufrufketten

# Aufrufkette: Beispiel

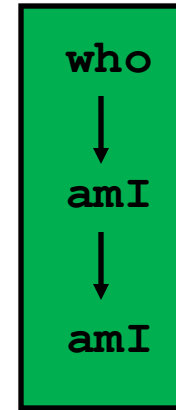
- Code Struktur

```
who (...)  
{  
    .  
    .  
    amI () ;  
    .  
    .  
}
```

Funktion **amI** rekursiv

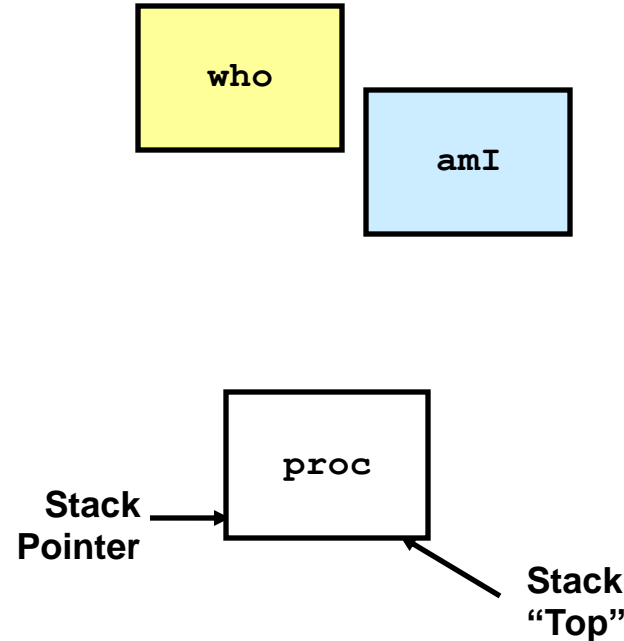
```
amI (...)  
{  
    .  
    .  
    amI () ;  
    .  
    .  
}
```

## Aufrufkette

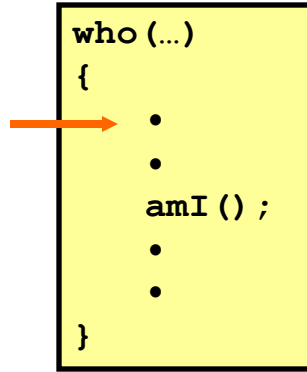


# Stack-Frames

- Inhalt
  - Lokale Variablen
  - Rückkehrinformation
  - Parameter
- Speicherverwaltung
  - Speicher allokiert beim Eintritt in die Funktion
  - Freigegeben bei der Rückkehr
- Hilfsmittel
  - Stack-Pointer



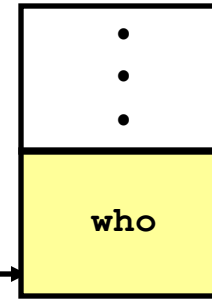
# Stack-Operationen



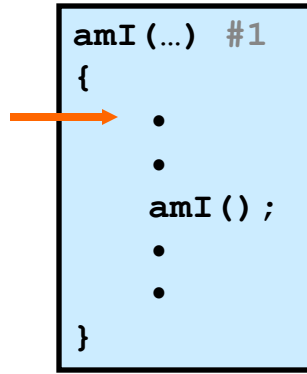
## Aufrufkette

who

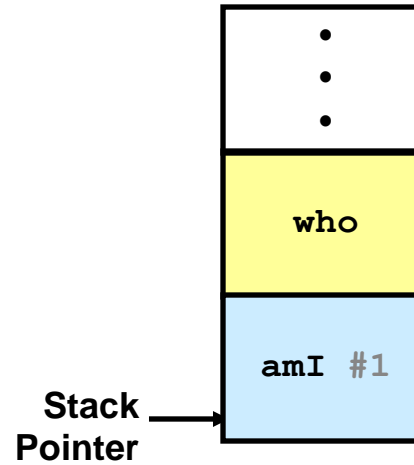
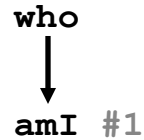
Stack  
Pointer



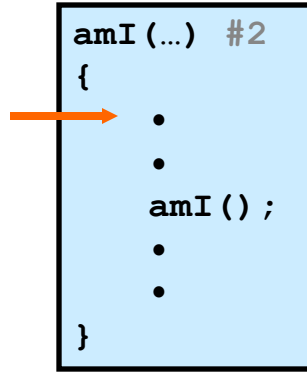
# Stack-Operationen



## Aufrufkette



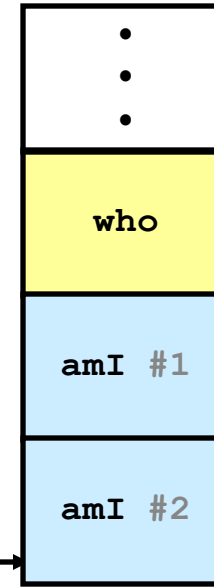
# Stack-Operationen



## Aufrufkette

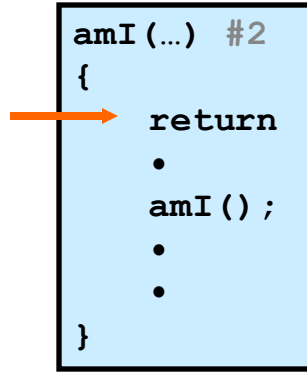


Stack  
Pointer

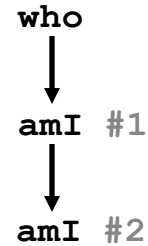




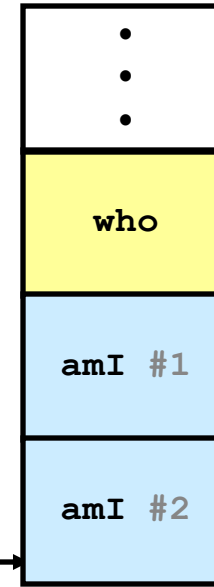
# Stack-Operationen



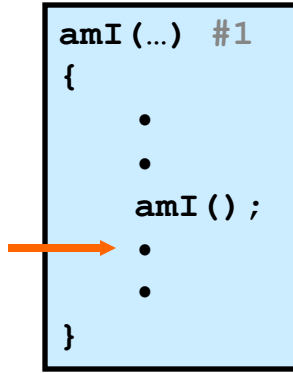
## Aufrufkette



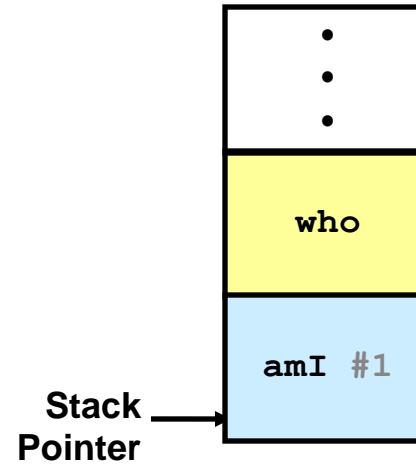
Stack  
Pointer



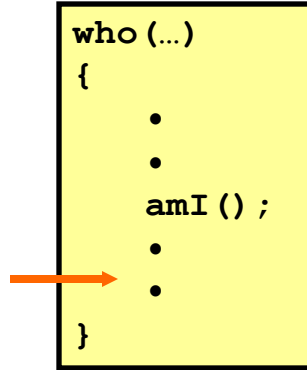
# Stack-Operationen



## Aufrufkette



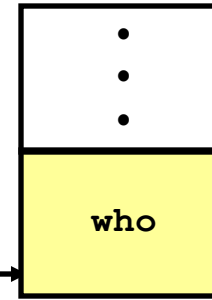
# Stack-Operationen



## Aufrufkette



Stack  
Pointer



# Zurück zum Debuggen

# gdb: Befehle #3

- `bt/backtrace` – gibt Aufrufkette (Stack-trace) aus
  - Mit `core dump`: Finden, welche Funktion das Programm ausgeführt hat, als es abgestürzt ist
  - Bei Unterbrechung: Ausgabe der Aufrufkette

# gdb: Befehle #4

- **up [N]** – Wechseln des Kontexts eine Ebene höher im Stack; Ändert den Rahmen (Scope) einer bestimmten Funktion im Stack
- **down [N]** – Wechseln des Kontexts eine Ebene niedriger
- **list [LINE/PROC]** – Anzeigen des Programmcodes; zeigt 5 Zeilen Code vor und nach dem momentanen Statement
- **print EXPR** – zeige die Werte der Expression EXPR

# gdb: Befehle #4

- **up [N]** – Wechseln des Kontexts eine Ebene höher im Stack; Ändert den Rahmen (Scope) einer bestimmten Funktion im Stack
- **down [N]** – Wechseln des Kontexts eine Ebene niedriger
- **list [LINE/PROC]** – Anzeigen des Programmcodes; zeigt 5 Zeilen Code vor und nach dem momentanen Statement
- **print EXPR** – zeige die Werte der Expression EXPR

DEMO 1 `simple_stack.c`

# Workflow

- Am häufigsten nach einem Laufzeitfehler
- Starten von `gdb` mit core Datei, anzeigen mit `bt`, welche Programmzeile zum Absturz geführt hat
- Wo das Programm abgestürzt ist, ist häufig ein erster Hinweis auf den Ort des Fehlers
- Allerdings nur ein erster Hinweis: Der Fehler kann viel früher aufgetreten sein.



- Wenn man eine Idee hat, wo der Fehler sein kann
  - Setzen eines **Breakpoints** kurz vorher im Code
  - **Laufen** lassen des Programms (mit denselben Daten)
  - Ausführen des Programms in **Einzelschritten** (single-step) durch die suspekte Region (Nach dem Breakpoint)
  - **Ansehen** der Werte der suspekten Variablen nach jedem Schritt
- Hierdurch sollte man feststellen können, welche Variable den falschen Wert hat

# Workflow

- Nachdem man herausgefunden hat, dass der Wert einer Variablen (z.B. x) falsch ist, muss man herausfinden, **warum** der Wert falsch ist.
- Es gibt zwei Möglichkeiten:
  - Das Statement, das x den Wert zuweist, ist falsch
  - Die Werte der anderen Variablen im Statement sind falsch
- Beispiel
  - `if (c > 0) { x = a + b; }`
  - Falls wir wissen, dass x falsch ist und dass die Bedingung und der Ausdruck richtig implementiert sind, dann müssen wir finden, wo a und b gesetzt werden

# Debugging Ideen

- Debugging Beispiel: „**wissenschaftliches Vorgehen**“
  - Entwicklung einer Hypothese
  - Datensammlung zur Verifikation der Hypothese
  - Änderung der Hypothese, falls neue Beweismittel vorliegen
- Die Hypothese ist:
  - „Ich denke, der Bug liegt in diesem Statement ...“

# Gesetze des Debuggens

(Zoltan Somogyi, Melbourne University)

- Before you can fix it, you must be able to break it (consistently)
  - Nicht reproduzierbare Bugs ... Heisenbugs ... sind schwierig
- If you can't find a bug where you're looking, you're looking in the wrong place
  - Eine Pause machen und später weitermachen, ist im Allgemeinen eine gute Idee
- It takes two people to find a subtle bug, but only one of them needs to know the program
  - Die zweite Person stellt Fragen, um die Annahmen des Debuggers in Frage zu stellen

# Bugs: Beispiel

Beispiel eines fehlerhaften(?) Programms, das einen Speicherbereich mit den Zahlen 256...1 füllen soll:

```
int main() {  
    int n = 256;  
    int buf[n];  
    unsigned int i;  
    for (i = n - 1; i >= 0; i--) {  
        buf[i] = n - i;  
    }  
}
```

# Bugs: Beispiel

Beispiel eines fehlerhaften(?) Programms, das einen Speicherbereich mit den Zahlen 256...1 füllen soll:

```
int main() {  
    int n = 256;  
    int buf[n];  
    unsigned int i;  
    for (i = n - 1; i >= 0; i--) {  
        buf[i] = n - i;  
    }  
}
```

DEMO 2 reverse\_buf.c

# Fehler in der Speicherverwaltung finden

# Typische Speicherfehler

- Memory Leaks
  - Speicher wird angefordert, aber nicht freigegeben
  - Fatal bei lang laufenden Prozessen
- Uninitialisierter Speicher
  - Speicher wird gelesen, ohne dass vorher geschrieben wurde
  - Fehler treten oft unerwartet auf, abhängig vom Speicherinhalt
  - Kann Informationen preisgeben (z.B. Crypto-Schlüssel)
- Use after free
  - Speicher wird gelesen, nachdem er freigegeben wurde
  - Fehler treten auf, wenn der Speicher neu vergeben wird



... ist ein Tool zum Auffinden von Speicherfehlern.

- Speicherleaks `--leak-check=full`
- Uninitialisierter Speicher `--undef-value-errors=yes`  
`--malloc-fill=0xfe`
- Use after free `--track-origins=yes`

➤ Wird auch von den automatischen Tests verwendet, um Speicherfehler zu finden

# clang Sanitizer

Oder falls valgrind nicht verfügbar, Address Sanitizer:

- Aktivieren `-fsanitize=address`
- Für bessere Stack-Traces `-fno-omit-frame-pointer`

Oder Memory Sanitizer (uninitialisierter Speicher):

- Aktivieren `-fsanitize=memory`
- Ursprung `-fsanitize-memory-track-origin`
- Für bessere Stack-Traces `-fno-omit-frame-pointer`

# clang Sanitizer

Oder falls valgrind nicht verfügbar, Address Sanitizer:

- Aktivieren `-fsanitize=address`
- Für bessere Strack-Traces `-fno-omit-frame-pointer`

Oder Memory Sanitizer (uninitialisierter Speicher):

- Aktivieren `-fsanitize=memory`
- Ursprung `-fsanitize-memory-track-origin`
- Für bessere Strack-Traces `-fno-omit-frame-pointer`

DEMO 3 `wrong_alloc.c`

# Beispiel: Bufferoverflows

# String-Library Code

## Implementation der Unix Funktion gets

- Keine Möglichkeit die Anzahl, der zu lesenden Zeichen anzugeben

```
/* Get string from stdin */
char *gets(char *dest) {
    int c = getc();
    char *p = dest;
    while (c != EOF && c != '\n') {
        *p++ = c;
        c = getc();
    }
    *p = '\0';
    return dest;
}
```

- Ähnliche Probleme auch bei anderen Unix-Funktionen
  - scanf, fscanf, sscanf, mit %s Konvertierungsspezifikation

# Angreifbarer Buffer-Code

```
/* Echo Line */  
void echo()  
{  
    char buf[4]; /* Way too small! */  
    gets(buf);  
    puts(buf);  
}
```

```
int main()  
{  
    printf("Type a string:");  
    echo();  
    return 0;  
}
```

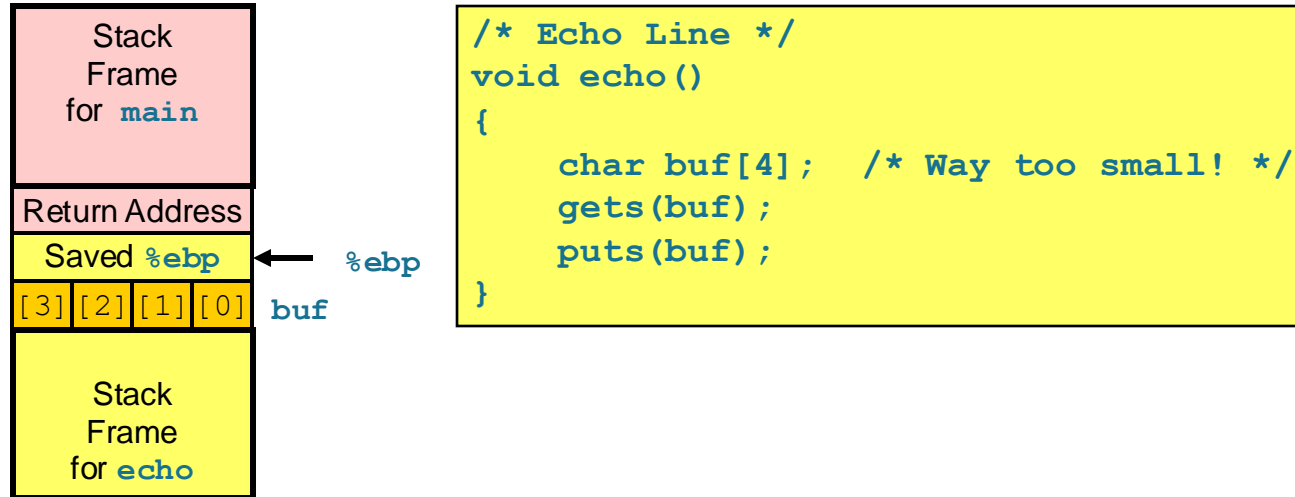
# Beispiel eines Bufferoverflows

```
unix>./bufdemo  
Type a string:123  
123
```

```
unix>./bufdemo  
Type a string:1234  
Segmentation Fault
```

```
unix>./bufdemo  
Type a string:12345678  
Segmentation Fault
```

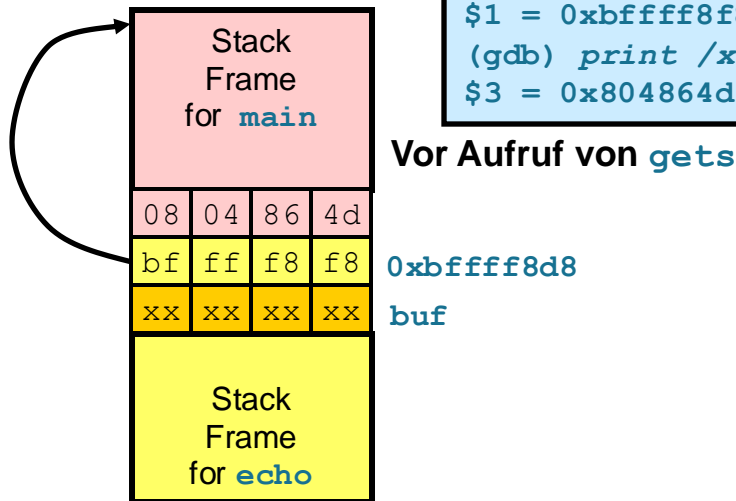
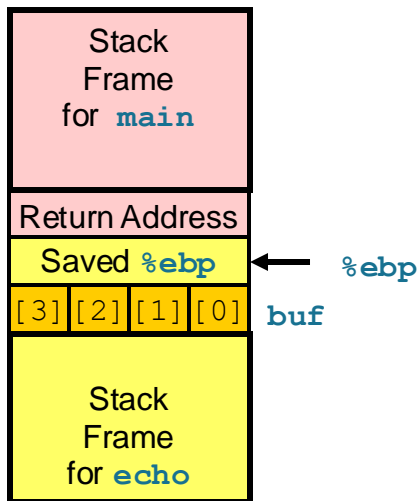
# Stack während Bufferoverflow: #1





# Stack während Bufferoverflow: #2

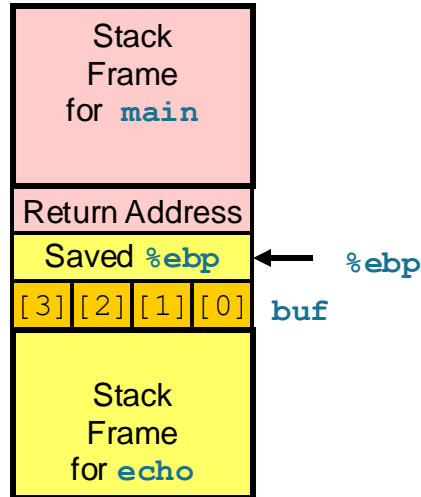
```
unix> gdb bufdemo
(gdb) break echo
Breakpoint 1 at 0x8048583
(gdb) run
Breakpoint 1, 0x8048583 in echo ()
(gdb) print /x *(unsigned *)$ebp
$1 = 0xbffff8f8
(gdb) print /x *((unsigned *)$ebp + 1)
$3 = 0x804864d
```



Vor Aufruf von `gets`

# Stack während Bufferoverflow: #3

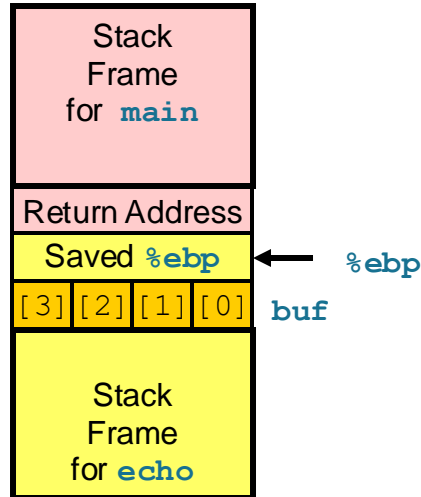
Vor dem Aufruf von `gets`



# Stack während Bufferoverflow: #3

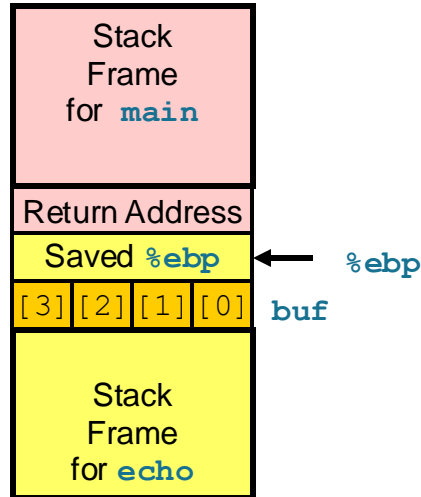
Vor dem Aufruf von `gets`

Eingabe: "123"

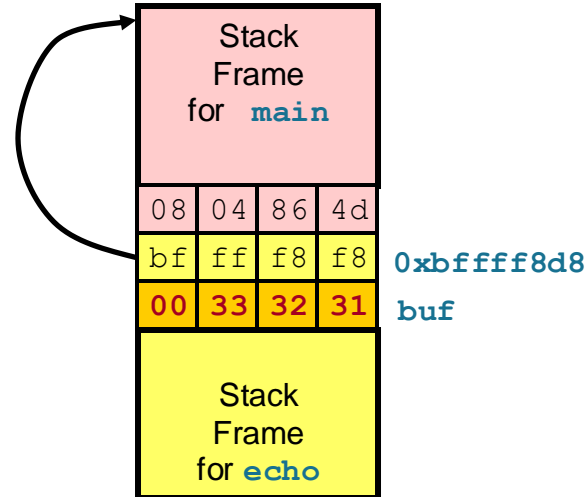


# Stack während Bufferoverflow: #3

Vor dem Aufruf von `gets`

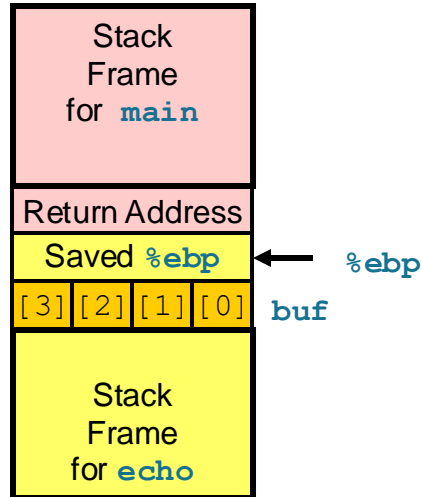


Eingabe: "123"

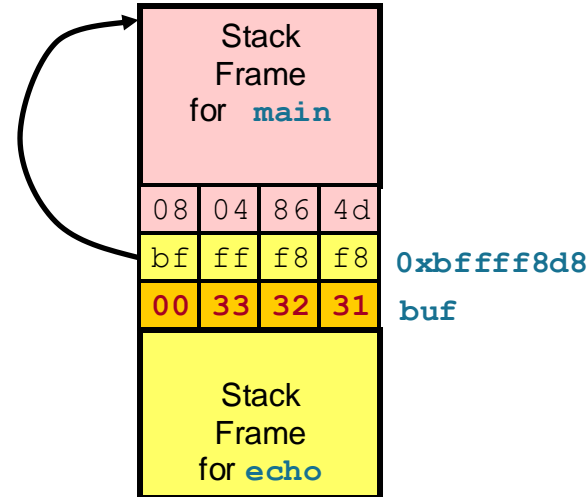


# Stack während Bufferoverflow: #3

Vor dem Aufruf von `gets`

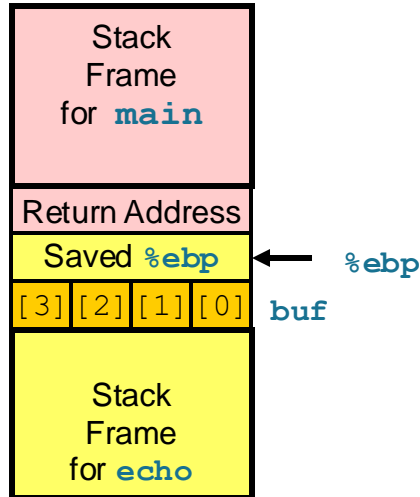


Eingabe: "123"



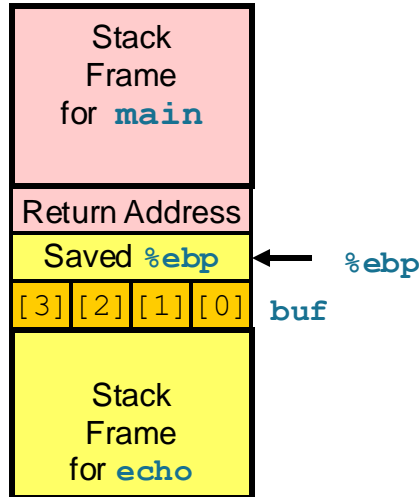
**Kein Problem**

# Stack während Bufferoverflow: #4



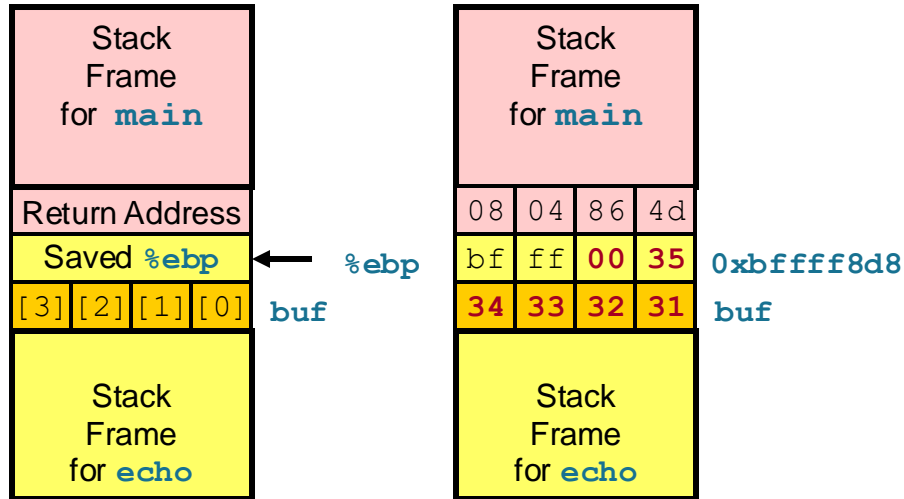
# Stack während Bufferoverflow: #4

Eingabe: "12345"



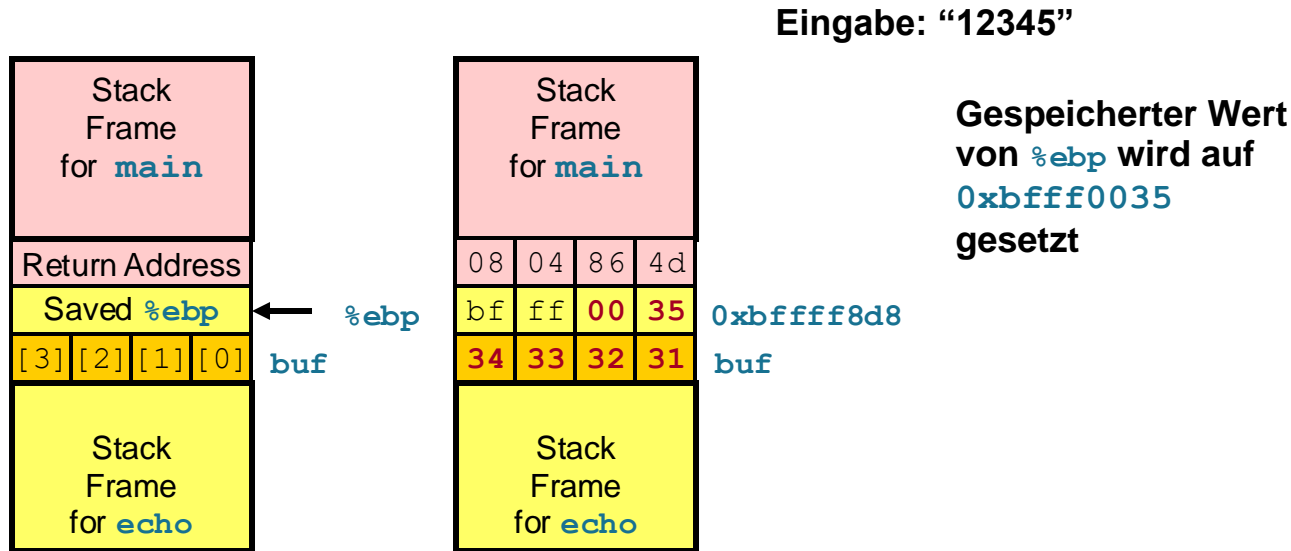
# Stack während Bufferoverflow: #4

Eingabe: "12345"

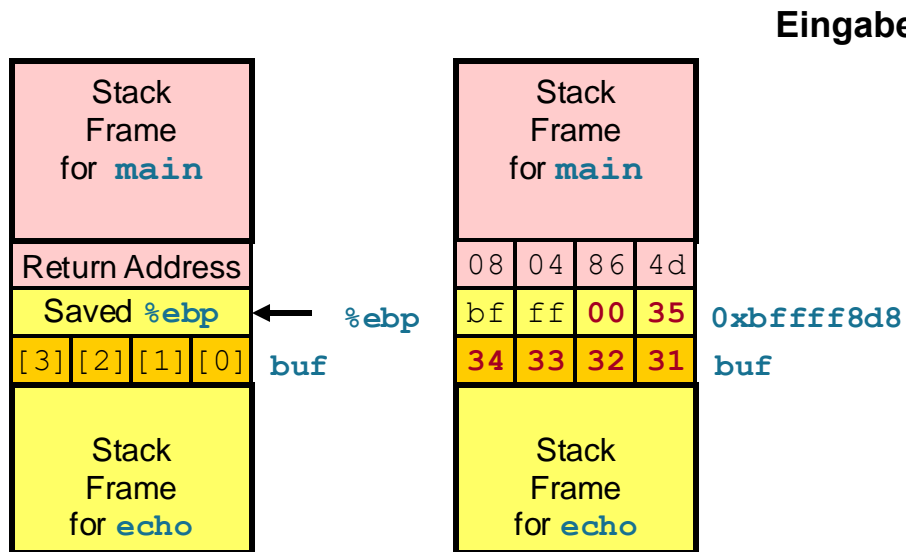




# Stack während Bufferoverflow: #4



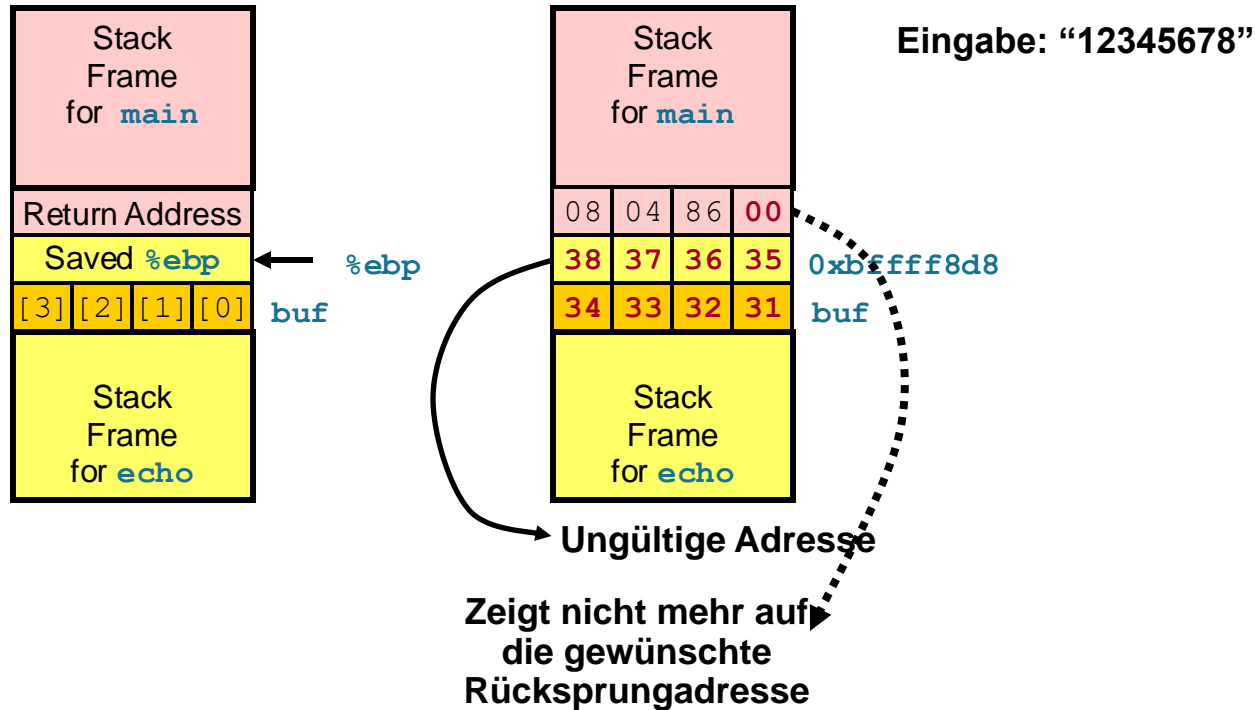
# Stack während Bufferoverflow: #4



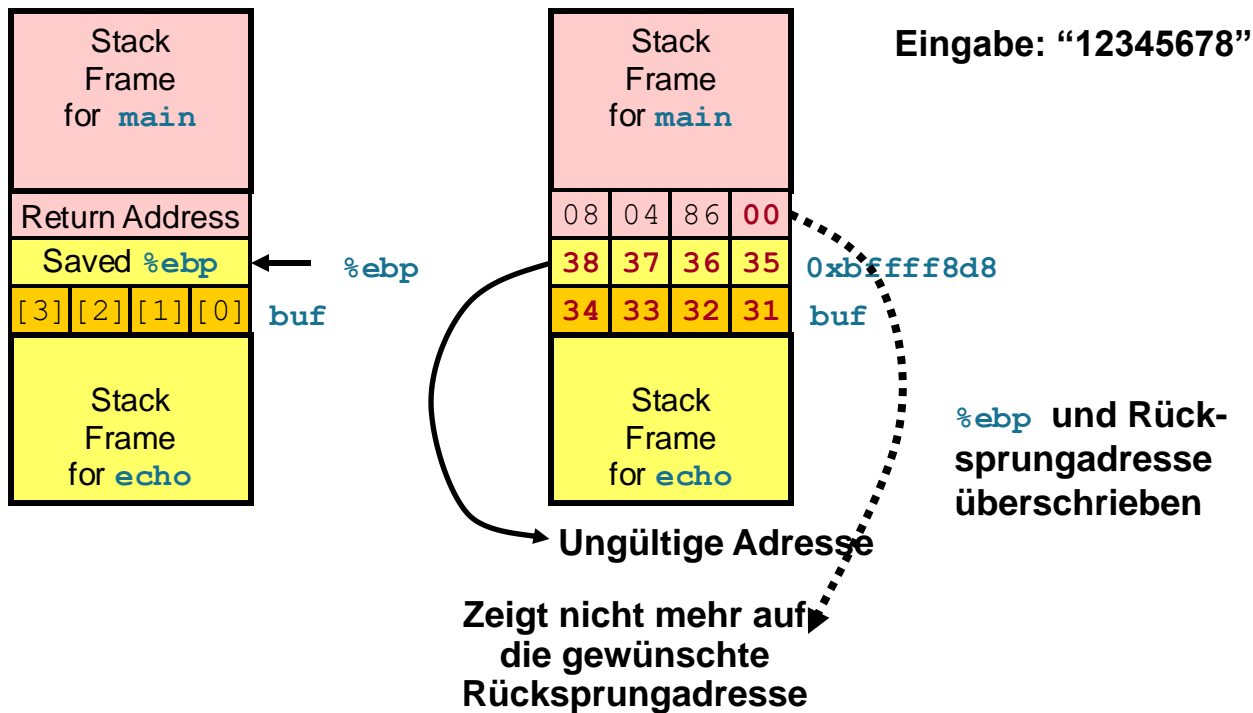
Gespeicherter Wert  
von `%ebp` wird auf  
`0xbfff0035`  
gesetzt

Schlechte Nach-  
richt, wenn später  
versucht wird, den  
Wert von `%ebp`  
wiederherzustellen

# Stack während Bufferoverflow: #5

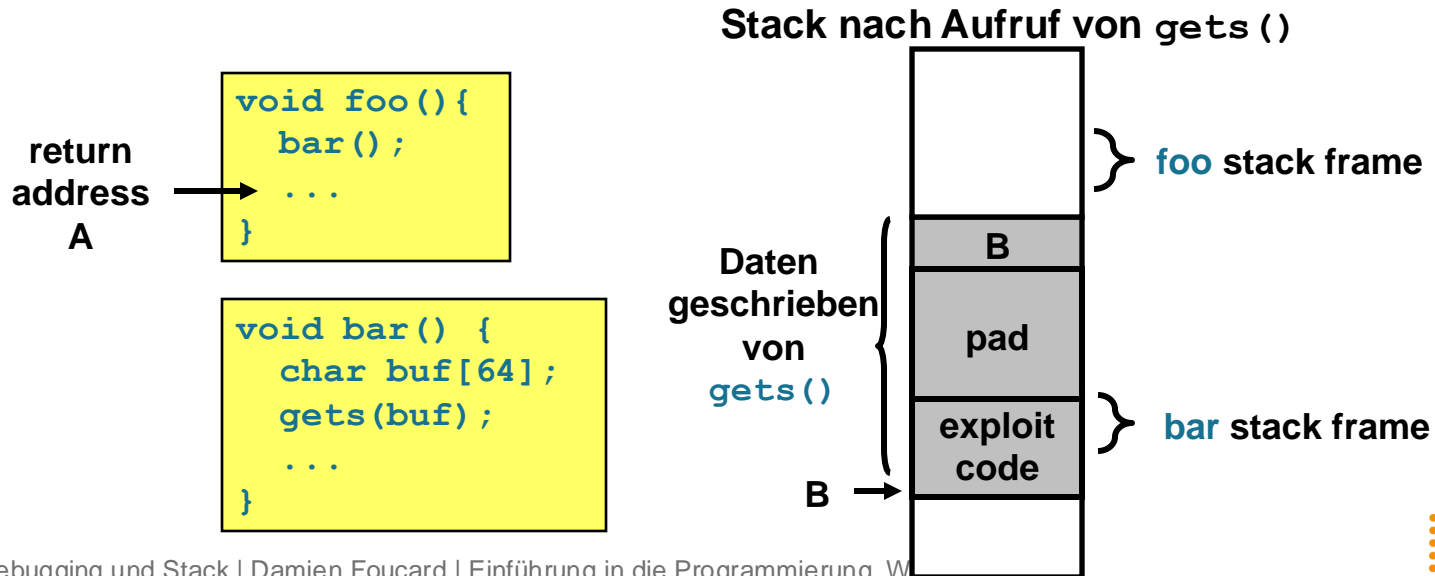


# Stack während Bufferoverflow: #5



# Ausnutzung von Bufferoverflows

- Eingabe String enthält binär Codierung des ausführbaren Codes
- Überschreibt Rücksprungadresse mit Adresse des Buffers
- Wenn bar() return ausführt, erfolgt der Sprung zum Exploit (exploit code)



# Ausblick

- VL 0 „Organisation und Inhalt“: Ablauf der Vorlesung, Termine
- VL 1 „Hello World“: „Lebenswichtiges“, Programtablauf, Programmierablauf, Kompilierung und Ausführung von Programmen
- VL 2 „Die ersten Schritte“: Erstes C-Programm, Elementare C-Strukturen, Datentypen, Operatoren, Schleifen
- VL 3 „Kontrollstrukturen & Funktionen“: Syntax, Semantik, bedingte Anweisungen, Blöcke, Sichtbarkeit
- VL 4 „Rekursive Funktionen & Bibliotheken“: rekursive Funktionsaufrufe, Modularisierung
- VL 5 „Typen“: Einfache und strukturierte Datentypen, Wertebereiche, Typendefinition
- VL 6 „Speicher und Adressen“: Speicher, Pointer, Funktionsaufrufe „call by value“ vs. „call by reference“
- VL 7 „Speicher und Arrays“: Speicher, Arrays, mehrdimensionale Arrays, Arrays und Pointer
- VL 8 „Dynamische Speicherverwaltung“: Speicherallokation, Fehlerbehandlung, Rückgabewerte, Arrays/Pointer/Adressen
- VL 9 „Strings, Kanäle, Git“: Strings und Arrays, Zeichensätze, Stringlänge, Ein- und Ausgabe, Arbeiten mit git
- VL 10 „Debugging und Stack“: Fehlverhalten/Bugs, Fehlersuche Strategien und Werkzeuge