Übung zu Betriebssystembau

Kontextwechsel

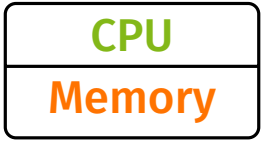
29. November 2022

Peter Ulbrich & Alexander Lochmann
(Mit Material vom Lehrstuhl 4 der FAU)

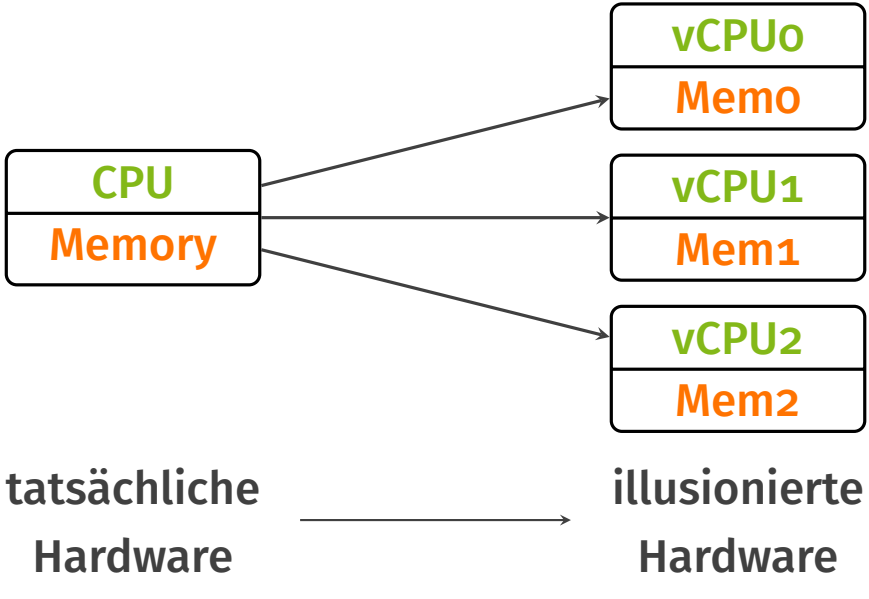
Arbeitsgruppe Systemsoftware
Technische Universität Dortmund

technische universität
dortmund

arbeitsgruppe
systemsoftware



tatsächliche Hardware


CPU
Memory
vCPU0
Mem0
vCPU1
Mem1
vCPU2
Mem2
tatsächliche Hardware
illusionierte Hardware

- Speicher virtualisieren

- CPU virtualisieren
  - nicht teilbar im Ort
  - aber teilbar in der Zeit

- Speicher virtualisieren ist einfach:

```
#define MEMSIZE 100
char Mem0[MEMSIZE];
char Mem1[MEMSIZE];
char Mem2[MEMSIZE];
```

- CPU virtualisieren
  - nicht teilbar im Ort
  - aber teilbar in der Zeit

Koroutinen

Motivation: mehr Aktivitätsträger als CPUs

```
void foo(){
  int f = 42;

  while (f--){
    kout << "foo"
         << f
         << endl;

  }

}
```

```
void bar(){
  int b = 23;

  while (b--){
    kout << "bar"
         << b
         << endl;

  }

}
```

Einseitiger Aufruf

```
void foo(){
  int f = 42;

  while (f--){
    kout << "foo"
         << f
         << endl;

  }
  bar();
}
```

```
void bar(){
  int b = 23;

  while (b--){
    kout << "bar"
         << b
         << endl;

  }

}
```

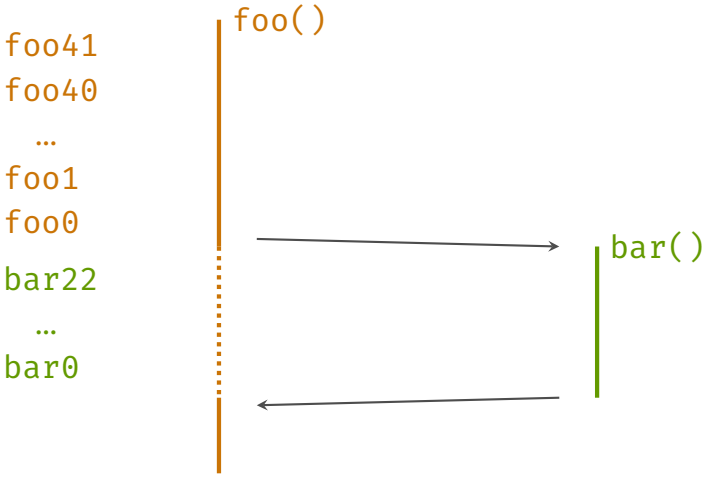
Einseitiger Aufruf

```
foo41
foo40
  …
foo1
foo0
```

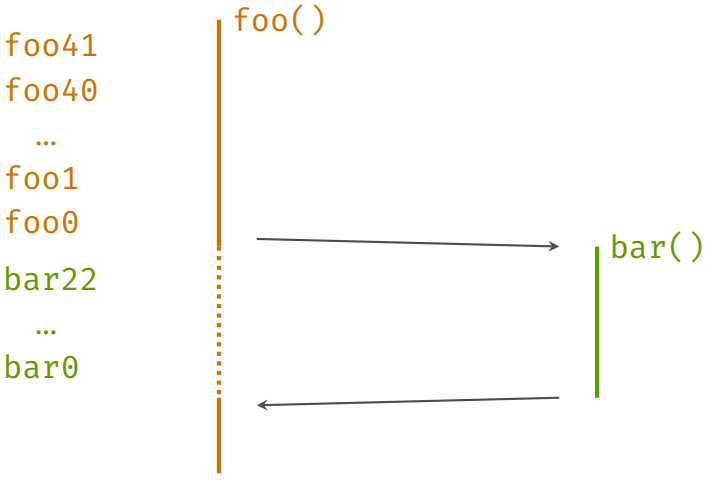
Einseitiger Aufruf

```
foo41
foo40
  …
foo1
foo0
bar22
  …
bar0
```

Einseitiger Aufruf



Einseitiger Aufruf



nicht parallel

Gegenseitiger Aufruf

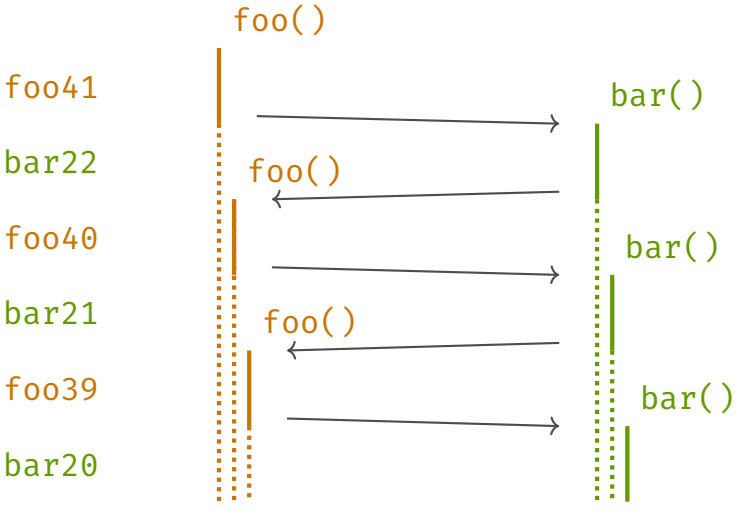
```
void foo(){
  static int f = 42;

  while (f--){
    kout << "foo"
         << f
         << endl;
    bar();
  }

}
```

```
void bar(){
  static int b = 23;

  while (b--){
    kout << "bar"
         << b
         << endl;
    foo();
  }

}
```

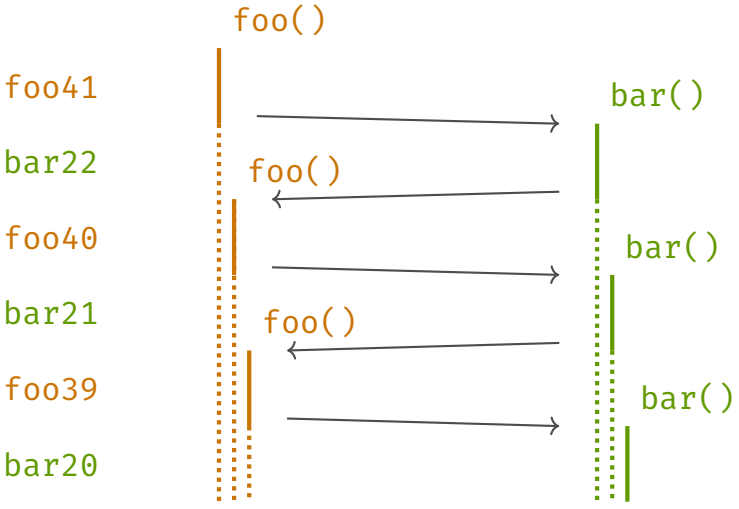
Gegenseitiger Aufruf

```
foo41
bar22
foo40
bar21
foo39
bar20
```

Gegenseitiger Aufruf



Gegenseitiger Aufruf



hoher Speicherverbrauch & (ggf.) Endlosrekursion

Umschaltung

Umschaltung

Kontrollflusszustand sichern & laden

Umschaltung

Kontrollflusszustand sichern & laden

- Stack
- Register

Umschaltung

Kontrollflusszustand sichern & laden

- Stack
- Register

} Kontext

Umschaltung

Kontrollflusszustand sichern & laden

- Stack
- Register

} Kontext

- Umschaltefunktion

Umschaltung

Kontrollflusszustand sichern & laden

- Stack
- Register

} Kontext

- Umschaltefunktion

Umschaltung

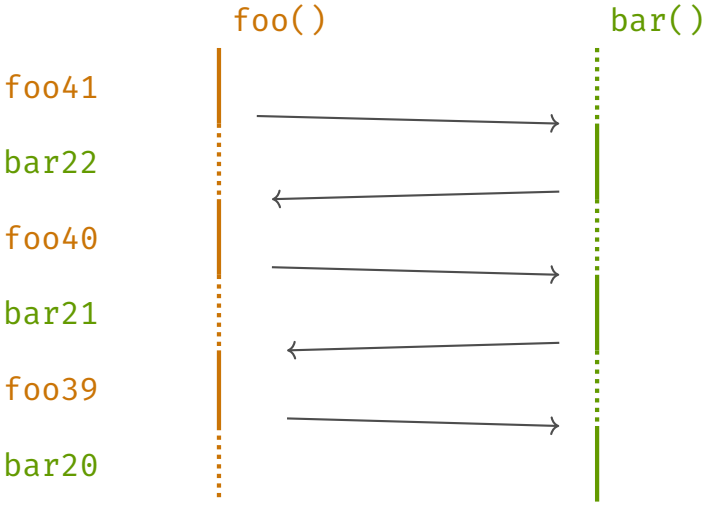
```
void foo(){
  int f = 42;

  while (f--){
    kout << "foo"
         << f
         << endl;
    context_switch(
        &stack_foo,
        &stack_bar
      );
  }
}
```

```
void bar(){
  int b = 23;

  while (b--){
    kout << "bar"
         << b
         << endl;
    context_switch(
        &stack_bar,
        &stack_foo
      );
  }
}
```

Umschaltung

```
foo41
bar22
foo40
bar21
foo39
bar20
```

Umschaltung



Genau was wir wollen.

Bild: twemoji (modifiziert)

Exkurs: Von der Hochsprache zum Maschinencode

```
#include "user/app1/appl.h"
#include "device/textstream.h"
#include "interrupt/guarded.h"
#include "machine/core.h"

extern TextStream kout;

void Application::action() {
    unsigned core = Core::getID();
    for (unsigned n = 0; ; ++n) {
        Guarded section;
        kout.setPos(0, id);
        kout << n;
        kout.flush();
    }
}
```

```
#include "user/app1/appl.h"
#include "device/textstream.h"
#include "interrupt/guarded.h"
#include "machine/core.h"

extern TextStream kout;

void Application::action() {
    unsigned core = Core::getID();
    for (unsigned n = 0; ; ++n) {
        Guarded section;
        kout.setPos(0, id);
        kout << n;
        kout.flush();
    }
}
```

höhere Programmiersprache

(3. Generation)

```
#include "user/app1/appl.h"
#include "device/textstream.h"
#include "interrupt/guarded.h"
#include "machine/core.h"

extern TextStream kout;

void Application::action() {
    unsigned core = Core::getID();
    for (unsigned n = 0; ; ++n) {
        Guarded section;
        kout.setPos(0, id);
        kout << n;
        kout.flush();
    }
}
```

höhere Programmiersprache

(3. Generation)

```
#include "user/app1/appl.h"
#include "device/textstream.h"
#include "interrupt/guarded.h"
#include "machine/core.h"

extern TextStream kout;

void Application::action() {
    unsigned core = Core::getID();
    for (unsigned n = 0; ; ++n) {
        Guarded section;
        kout.setPos(0, id);
        kout << n;
        kout.flush();
    }
}
```

```
f3 0f 1e fa 55 53 31 db
48 83 ec 08 e8 4f d1 ff
ff 89 c5 0f 1f 44 00 00
e8 e3 c3 ff ff 89 ea 31
f6 bf 84 45 02 01 e8 e5
d2 ff ff 89 de bf 20 45
02 01 83 c3 01 e8 c6 fd
ff ff bf 20 45 02 01 e8
1c bf ff ff e8 37 c4 ff
ff eb cd
```

höhere Programmiersprache
(3. Generation)

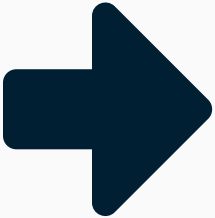
```
#include "user/app1/appl.h"
#include "device/textstream.h"
#include "interrupt/guarded.h"
#include "machine/core.h"

extern TextStream kout;

void Application::action() {
    unsigned core = Core::getID();
    for (unsigned n = 0; ; ++n) {
        Guarded section;
        kout.setPos(0, id);
        kout << n;
        kout.flush();
    }
}
```

höhere Programmiersprache
(3. Generation)

```
f3 0f 1e fa 55 53 31 db
48 83 ec 08 e8 4f d1 ff
ff 89 c5 0f 1f 44 00 00
e8 e3 c3 ff ff 89 ea 31
f6 bf 84 45 02 01 e8 e5
d2 ff ff 89 de bf 20 45
02 01 83 c3 01 e8 c6 fd
ff ff bf 20 45 02 01 e8
1c bf ff ff e8 37 c4 ff
ff eb cd
```

Maschinensprache
(1. Generation)

```
#include "user/app1/appl.h"
#include "device/textstream.h"
#include "interrupt/guarded.h"
#include "machine/core.h"

extern TextStream kout;

void Application::action() {
    unsigned core = Core::getID();
    for (unsigned n = 0; ; ++n) {
        Guarded section;
        kout.setPos(0, id);
        kout << n;
        kout.flush();
    }
}
```

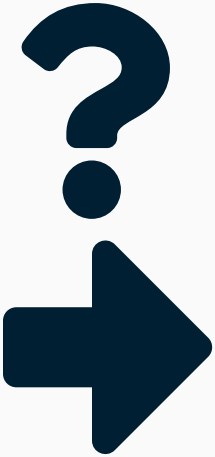


```
f3 0f 1e fa 55 53 31 db
48 83 ec 08 e8 4f d1 ff
ff 89 c5 0f 1f 44 00 00
e8 e3 c3 ff ff 89 ea 31
f6 bf 84 45 02 01 e8 e5
d2 ff ff 89 de bf 20 45
02 01 83 c3 01 e8 c6 fd
ff ff bf 20 45 02 01 e8
1c bf ff ff e8 37 c4 ff
ff eb cd
```

höhere Programmiersprache
(3. Generation)

Maschinensprache
(1. Generation)

```
#include "user/app1/appl.h"
#include "device/textstream.h"
#include "interrupt/guarded.h"
#include "machine/core.h"

extern TextStream kout;

void Application::action() {
    unsigned core = Core::getID();
    for (unsigned n = 0; ; ++n) {
        Guarded section;
        kout.setPos(0, id);
        kout << n;
        kout.flush();
    }
}
```



```
f3 0f 1e fa 55 53 31 db
48 83 ec 08 e8 4f d1 ff
ff 89 c5 0f 1f 44 00 00
e8 e3 c3 ff ff 89 ea 31
f6 bf 84 45 02 01 e8 e5
d2 ff ff 89 de bf 20 45
02 01 83 c3 01 e8 c6 fd
ff ff bf 20 45 02 01 e8
1c bf ff ff e8 37 c4 ff
ff eb cd
```

höhere Programmiersprache
(3. Generation)

Maschinensprache
(1. Generation)

```
#include "user/app1/appl.h"
#include "device/textstream.h"
#include "interrupt/guarded.h"
#include "machine/core.h"

extern TextStream kout;

void Application::action() {
    unsigned core = Core::getID();
    for (unsigned n = 0; ; ++n) {
        Guarded section;
        kout.setPos(0, id);
        kout << n;
        kout.flush();
    }
}
```

```
class TextStream : public OutputStream, public TextWindow {
  // ...

} kout;

void Application::action() {
    unsigned n = 0;
    unsigned core;
    core = Core::getID();
    while(true) {
        Guard::enter();
        kout.setPos(0, id);
        unsigned i = n
        n += 1;
        kout.operator<<(i);
        kout.flush();
        Guard::leave();
    }
}
```

```
class TextStream : public OutputStream, public TextWindow {
  // ...

} kout;

void Application::action(Application * this) {
    unsigned n = 0;
    unsigned core;
    core = Core::getID();
    while(true) {
        Guard::enter();
        TextWindow::setPos(&kout, 0, id);
        unsigned i = n
        n += 1;
        OutputStream::operator<<(&kout, i);
        TextStream::flush(&kout);
        Guard::leave();
    }
}
```

```
class TextStream  {
  class OutputStream { ... };
  class TextWindow { ... };
} kout;

void Application::action(Application * this) {
    unsigned n = 0;
    unsigned core;
    core = Core::getID();
    while(true) {
        Guard::enter();
        TextWindow::setPos(&(kout.TextWindow), 0, id);
        unsigned i = n
        n += 1;
        OutputStream::operator<<(&(kout.OutputStream), i);
        TextStream::flush(&(kout.OutputStream));
        Guard::leave();
    }
}
```

```
class TextStream  {
  class OutputStream { ... };  // offset 0
  class TextWindow { ... };    // offset 64
} kout;

void Application::action(Application * this) {
    unsigned n = 0;
    unsigned core;
    core = Core::getID();
    while(true) {
        Guard::enter();
        TextWindow::setPos(&kout+64, 0, id);
        unsigned i = n
        n += 1;
        OutputStream::operator<<(&kout+0, i);
        TextStream::flush(&kout+0);
        Guard::leave();
    }
}
```

```
class TextStream  {
  class OutputStream { ... };  // offset 0
  class TextWindow { ... };    // offset 64
} kout;

void _ZN11Application6actionEv(Application * this) {
    unsigned n = 0;
    unsigned core;
    core = _ZN4Core5getIDEv();
    while(true) {
        _ZN5Guard5enterEv();
        _ZN10TextWindow6setPosEjj(&kout+64, 0, id);
        unsigned i = n
        n += 1;
        _ZN12OutputStreamlsEj(&kout, i);
        _ZN10TextStream5flushEv(&kout);
        _ZN5Guard5leaveEv();
    }
}
```

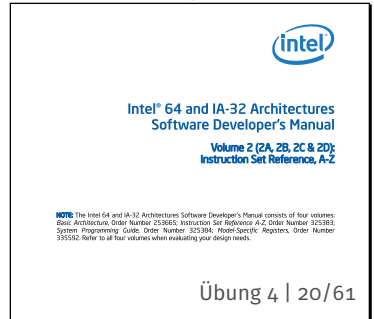
```
void _ZN11Application6actionEv(Application * this) {



        unsigned n = 0
        unsigned core;
        core = _ZN4Core5getIDEv();

        while(true) {
                _ZN5Guard5enterEv();



                _ZN10TextWindow6setPosEjj(&kout+64, 0, core)
                unsigned i = n

                n += 1;
                _ZN12OutputStreamlsEj(&kout, i);

                _ZN10TextStream5flushEv(&kout);
                _ZN5Guard5leaveEv();
        }
}
```

```
_ZN11Application6actionEv:
  endbr64
  push   rbp
  push   rbx
  xor    ebx, ebx
  sub    rsp, 0x8
  call   _ZN4Core5getIDEv
  mov    ebp, eax
LOOP:
  call   _ZN5Guard5enterEv
  mov    edx, ebp
  xor    esi, esi
  mov    edi, kout+64
  call   _ZN10TextWindow6setPosEjj
  mov    esi, ebx
  mov    edi, kout
  add    ebx, 0x1
  call   _ZN12OutputStreamlsEj
  mov    edi, kout
  call   _ZN10TextStream5flushEv
  call   _ZN5Guard5leaveEv
  jmp    LOOP
```

```
_ZN11Application6actionEv:
  endbr64
  push   rbp
  push   rbx
  xor    ebx, ebx
  sub    rsp, 0x8
  call   _ZN4Core5getIDEv
  mov    ebp, eax
LOOP:
  call   _ZN5Guard5enterEv
  mov    edx, ebp
  xor    esi, esi
  mov    edi, kout+64
  call   _ZN10TextWindow6setPosEjj
  mov    esi, ebx
  mov    edi, kout
  add    ebx, 0x1
  call   _ZN12OutputStreamlsEj
  mov    edi, kout
  call   _ZN10TextStream5flushEv
  call   _ZN5Guard5leaveEv
  jmp    LOOP
```

Assembler

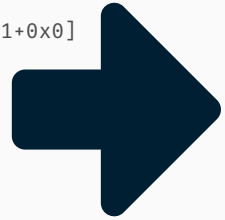
- Sprache der 2. Gen. (maschinenorientiert)
- **Mnemonics** statt Bytes
- 1:1-Übersetzung
- für x64-Architektur Dokumentation im *Intel-Manual, Vol. 2*



```
0100ba80 <_ZN11Application6actionEv>:
 100ba80:   endbr64
 100ba84:   push   rbp
 100ba85:   push   rbx
 100ba86:   xor    ebx, ebx
 100ba88:   sub    rsp, 0x8
 100ba8c:   call   1008be0 <_ZN4Core5getIDEv>
 100ba91:   mov    ebp, eax
 100ba93:   nop    DWORD PTR [rax+rax*1+0x0]
 100ba98:   call   1007e80 <_ZN5Guard5enterEv>
 100ba9d:   mov    edx, ebp
 100ba9f:   xor    esi, esi
 100baa1:   mov    edi, 0x1024584 <kout+64>
 100baa6:   call   1008d90 <_ZN10TextWindow6setPosEjj>
 100baab:   mov    esi, ebx
 100baad:   mov    edi, 0x1024520 <kout>
 100bab2:   add    ebx, 0x1
 100bab5:   call   100b880 <_ZN12OutputStreamlsEj>
 100baba:   mov    edi, 0x1024520 <kout>
 100babf:   call   10079e0 <_ZN10TextStream5flushEv>
 100bac4:   call   1007f00 <_ZN5Guard5leaveEv>
 100bac9:   jmp    100ba98 <_ZN11Application6actionEv+0x18>
```

```
0100ba80 <_ZN11Application6actionEv>:
 100ba80:   endbr64
 100ba84:   push   rbp
 100ba85:   push   rbx
 100ba86:   xor    ebx, ebx
 100ba88:   sub    rsp, 0x8
 100ba8c:   call   1008be0
 100ba91:   mov    ebp, eax
 100ba93:   nop    DWORD PTR [rax+rax*1+0x0]
 100ba98:   call   1007e80
 100ba9d:   mov    edx, ebp
 100ba9f:   xor    esi, esi
 100baa1:   mov    edi, 0x1024584
 100baa6:   call   1008d90
 100baab:   mov    esi, ebx
 100baad:   mov    edi, 0x1024520
 100bab2:   add    ebx, 0x1
 100bab5:   call   100b880
 100baba:   mov    edi, 0x1024520
 100babf:   call   10079e0
 100bac4:   call   1007f00
 100bac9:   jmp    100ba98
```

```
0100ba80 <_ZN11Application6actionEv>:
 100ba80:   endbr64                                  f3 0f 1e fa
 100ba84:   push   rbp                               55
 100ba85:   push   rbx                               53
 100ba86:   xor    ebx, ebx                          31 db
 100ba88:   sub    rsp, 0x8                          48 83 ec 08
 100ba8c:   call   1008be0                           e8 4f d1 ff ff
 100ba91:   mov    ebp, eax                          89 c5
 100ba93:   nop    DWORD PTR [rax+rax*1+0x0]         0f 1f 44 00 00
 100ba98:   call   1007e80                           e8 e3 c3 ff ff
 100ba9d:   mov    edx, ebp                          89 ea
 100ba9f:   xor    esi, esi                          31 f6
 100baa1:   mov    edi, 0x1024584                    bf 84 45 02 01
 100baa6:   call   1008d90                           e8 e5 d2 ff ff
 100baab:   mov    esi, ebx                          89 de
 100baad:   mov    edi, 0x1024520                    bf 20 45 02 01
 100bab2:   add    ebx, 0x1                          83 c3 01
 100bab5:   call   100b880                           e8 c6 fd ff ff
 100baba:   mov    edi, 0x1024520                    bf 20 45 02 01
 100babf:   call   10079e0                           e8 1c bf ff ff
 100bac4:   call   1007f00                           e8 37 c4 ff ff
 100bac9:   jmp    100ba98                           eb cd
```

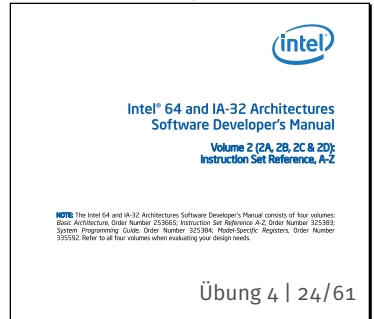


```
_ZN11Application6actionEv:
  endbr64
  push   rbp
  push   rbx
  xor    ebx, ebx
  sub    rsp, 0x8
  call   _ZN4Core5getIDEv
  mov    ebp, eax
LOOP:
  call   _ZN5Guard5enterEv
  mov    edx, ebp
  xor    esi, esi
  mov    edi, kout+64
  call   _ZN10TextWindow6setPosEjj
  mov    esi, ebx
  mov    edi, kout
  add    ebx, 0x1
  call   _ZN12OutputStreamlsEj
  mov    edi, kout
  call   _ZN10TextStream5flushEv
  call   _ZN5Guard5leaveEv
  jmp    LOOP
```

```
_ZN11Application6actionEv:
  endbr64
  push   rbp
  push   rbx
  xor    ebx, ebx
  sub    rsp, 0x8
  call   _ZN4Core5getIDEv
  mov    ebp, eax
LOOP:
  call   _ZN5Guard5enterEv
  mov    edx, ebp
  xor    esi, esi
  mov    edi, kout+64
  call   _ZN10TextWindow6setPosEjj
  mov    esi, ebx
  mov    edi, kout
  add    ebx, 0x1
  call   _ZN12OutputStreamlsEj
  mov    edi, kout
  call   _ZN10TextStream5flushEv
  call   _ZN5Guard5leaveEv
  jmp    LOOP
```

Assembler

- Sprache der 2. Gen. (maschinenorientiert)
- **Mnemonics** statt Bytes
- 1:1-Übersetzung
- für x64-Architektur Dokumentation im *Intel-Manual, Vol. 2*



Syntaxunterschiede bei x86-Assembler

Intel:

`mov edi, 0x17`

(Ziel, Quelle)

`objdump -M intel`

Standard bei `nasm` (Netwide Assembler)

AT&T:

`mov $0x17, %edi`

(Quelle, Ziel)

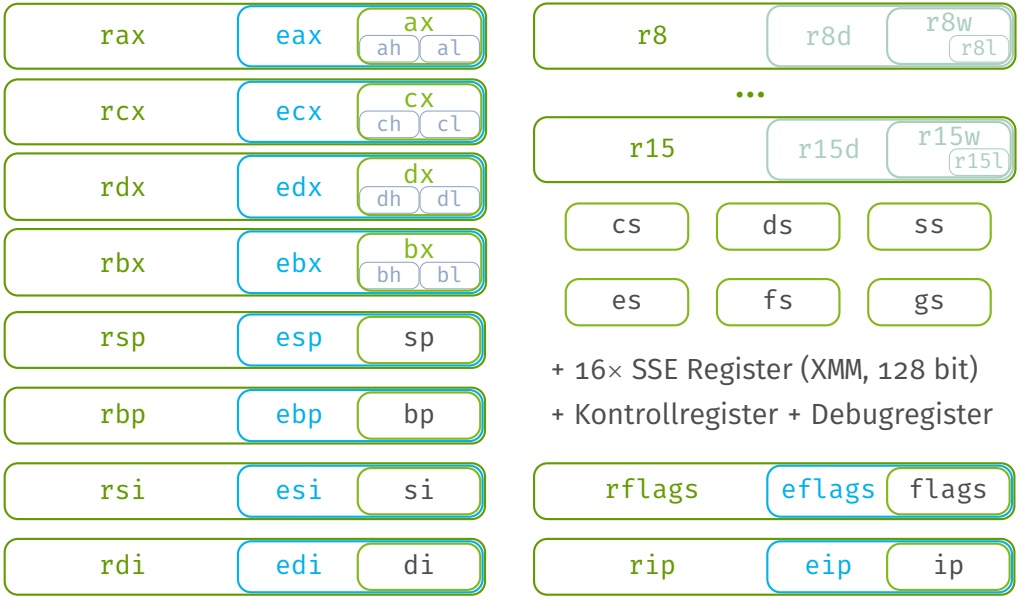
Standard bei `objdump`

und GCC `inline asm`

Assembler

Berechnungen auf Registern,

Long Mode Register



Assembler

Berechnungen auf Registern, Zugriff mittels **mov-Instruktion**

Assembler: `mov`

Berechnungen auf Registern, Zugriff mittels **`mov`-Instruktion**

Register ← Konstante `mov rax, 42`

Assembler: `mov`

Berechnungen auf Registern, Zugriff mittels **`mov`-Instruktion**

Register ← Konstante	`mov rax, 42`
Register ← Register	`mov rax, rcx`

Assembler: mov

Berechnungen auf Registern, Zugriff mittels **mov-Instruktion**

Register ← Konstante	`mov rax, 42`
Register ← Register	`mov rax, rcx`
Register ↔ Speicher	`mov rax, [0xb8000]`
	`mov [0xb8000 + 4], rax`
	`mov rax, [rcx + rdx]`
	`mov rax, [rsp]`
	~~`mov [0xb8000], [0xb8002]`~~

Besonderheiten bei `mov`

Besonderheiten bei `mov`

`mov eax, XX` `eax` wird gesetzt, obere Hälfte **genullt**

Besonderheiten bei `mov`

`mov eax, XX` `eax` wird gesetzt, obere Hälfte **genullt**

`mov ax, XX` `ax` wird gesetzt, **Rest unverändert**

`mov al, XX` `al` wird gesetzt, **Rest unverändert**

Falls Rest gesetzt werden muss: `movzx`, `movsx`

Details zur Performance bei partiellem Schreiben: → StackOverflow

Operationen mit dem Stack

Stack ← Register `push rax`

Zur Erinnerung – für den Stack auf x64 gilt

- Der Stack „wächst“ von *oben* (hohe Adresse) nach *unten* (niedrige Adresse)
- Der Stackzeiger (`rsp`) zeigt auf das zuletzt hinzugefügte Datum

`push X` verringert zuerst den Wert von `rsp` um 8 Byte und legt dann `X` an die resultierende Adresse

`pop X` liest den Inhalt des Speichers, auf das `rsp` zeigt, in `X` und erhöht anschließend den Wert von `rsp` um 8 Byte.

Zur Erinnerung – für den Stack auf x64 gilt

- Der Stack „wächst“ von *oben* (hohe Adresse) nach *unten* (niedrige Adresse)
- Der Stackzeiger (`rsp`) zeigt auf das zuletzt hinzugefügte Datum

  `push X` verringert zuerst den Wert von `rsp` um 8 Byte und legt dann `X` an die resultierende Adresse

  `pop X` liest den Inhalt des Speichers, auf das `rsp` zeigt, in `X` und erhöht anschließend den Wert von `rsp` um 8 Byte.

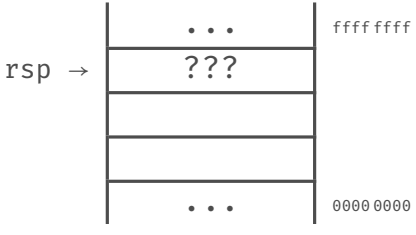
- Bei Funktionsaufrufen muss der Stack an 16 Byte ausgerichtet sein

Operationen mit dem Stack

Stack ← Register `push rax`

Operationen mit dem Stack

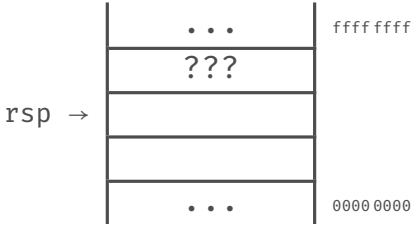
Stack ← Register `push rax`



Operationen mit dem Stack

Stack ← Register

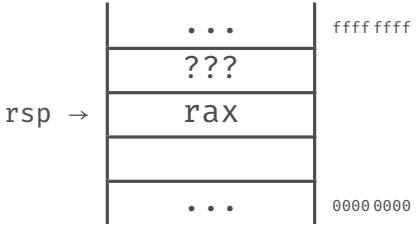
```
push rax
sub rsp, 8
```



Operationen mit dem Stack

Stack ← Register

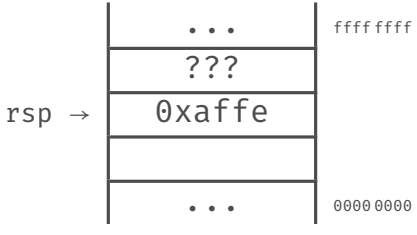
```
push rax
sub rsp, 8
mov [rsp], rax
```



Operationen mit dem Stack

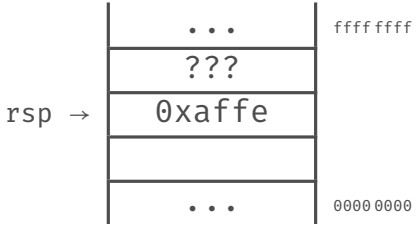
```
mov eax, 0xaffe
push rax
sub rsp, 8
mov [rsp], rax
```

Stack ← Register



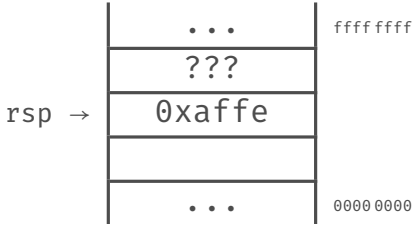
Operationen mit dem Stack

```
                mov eax, 0xaffe
Stack ← Register  push rax
                sub rsp, 8
                mov [rsp], rax
Register ← Stack  pop rcx
```



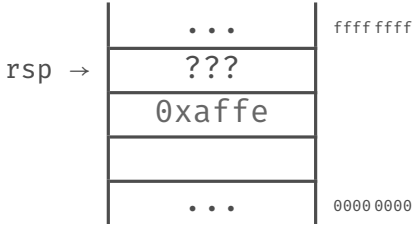
Operationen mit dem Stack

```
                mov eax, 0xaffe
Stack ← Register  push rax
                sub rsp, 8
                mov [rsp], rax
Register ← Stack  pop rcx
                mov rcx, [rsp]
```



Operationen mit dem Stack

```
                    mov eax, 0xaffe
Stack ← Register    push rax
                    sub rsp, 8
                    mov [rsp], rax
Register ← Stack    pop rcx
                    mov rcx, [rsp]
                    add rsp, 8
```



Mathematische Operationen

Addition/Subtraktion	`add rax, 4`	`x += 4;`
	`sub QWORD [rax], rcx`	`*x -= rcx;`
	`inc rax`	`x++;`
	`dec rax`	`x--;`
Bit-Operationen	`and rax, 0xff`	`x &= 0xff;`
	`or rax, [rcx]`	`x |= *rcx;`
	`xor rax, 0xaa`	`x ^= 0xaa;`
	`not rax`	`x = !x;`
	`neg rcx`	`x = ~x;`
	`shl rax, 1`	`x <<= 1;`
	`shr rax, 1`	`x >>= 1;`

Kontrollfluss-Beeinflussung

Sprungmarke	`LABEL:` `  <...>`
Einfache Sprünge	`jmp LABEL`
Bedingte Sprünge	`je/jne/jg/jge/jl/jle/jz LABEL`

Letztere sind abhängig von den Flags im Statusregister (**`rflags`**)

Kontrollfluss-Beeinflussung

Sprungmarke

```
LABEL:
    <...>
```

Einfache Sprünge

```
jmp LABEL
```

Bedingte Sprünge

```
je/jne/jg/jge/jl/jle/jz LABEL
```

Letztere sind abhängig von den Flags im Statusregister (`rflags`)

Mathematische Operationen und Vergleiche setzen *carry*, *zero* & *sign flag* (Bit 0, 6 & 7 im Statusregister):

Vergleiche

```
cmp rax, rdx
cmp rax, 0x10
≅ sub rax, 0x10
```

(aber `rax` unverändert)

Funktionsaufrufe

Funktionsaufruf

```
call function
```

```
push <next RIP>
jmp function
```

Rückkehr aus Funktion

```
ret
```

```
pop rip
```

Rückkehr aus Interrupt

```
iretq
```

Stellt Hardware-Kontext (`rip`, `cs`, `rflags`) wieder her

Weiterer Exkurs: Aufrufkonvention

Kontextsicherung gemäß Konvention

```
void baz(){
  ...

  func();

  ...
}
```

```
void func(){

  ...

  return;
}
```

Kontextsicherung gemäß Konvention

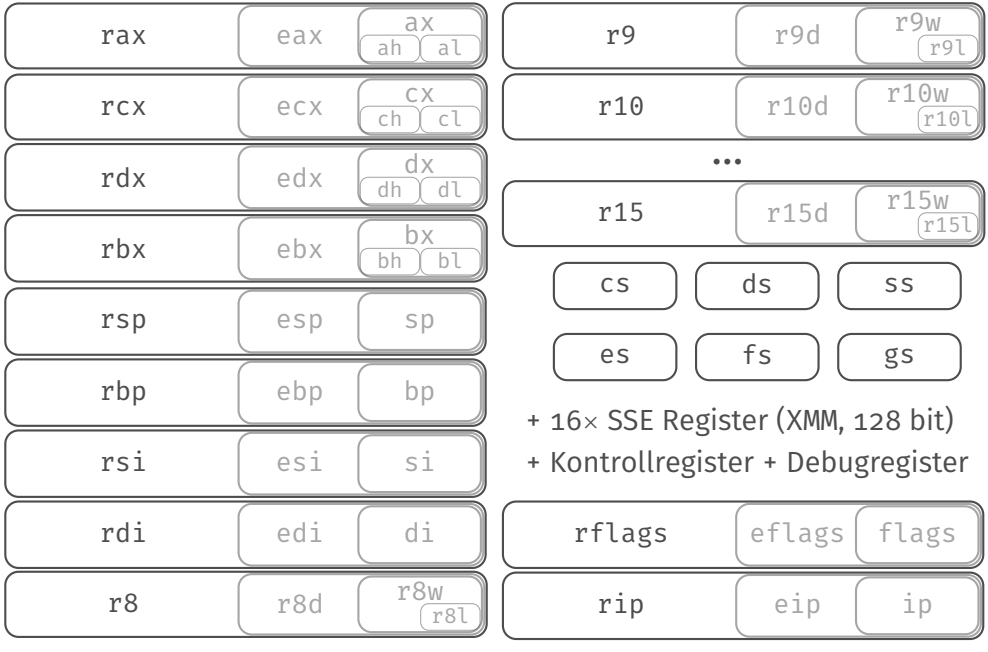
```
void baz(){
  ...

  // flüchtige Register
  // sichern

  func();

  // flüchtige Register
  // wiederherstellen

  ...
}
```

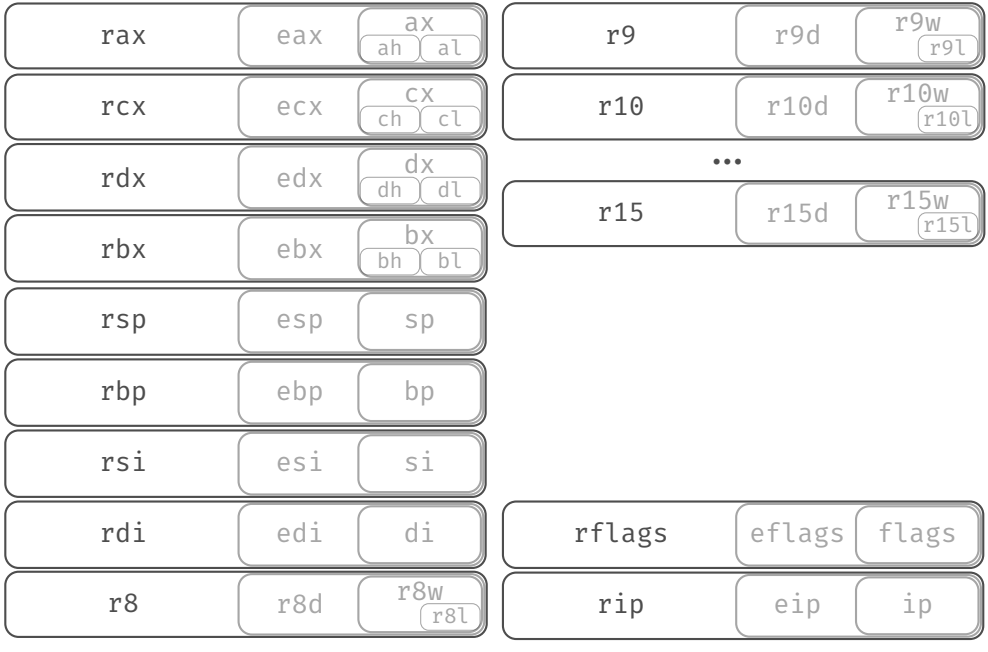
```
void func(){

  ...

  return;
}
```

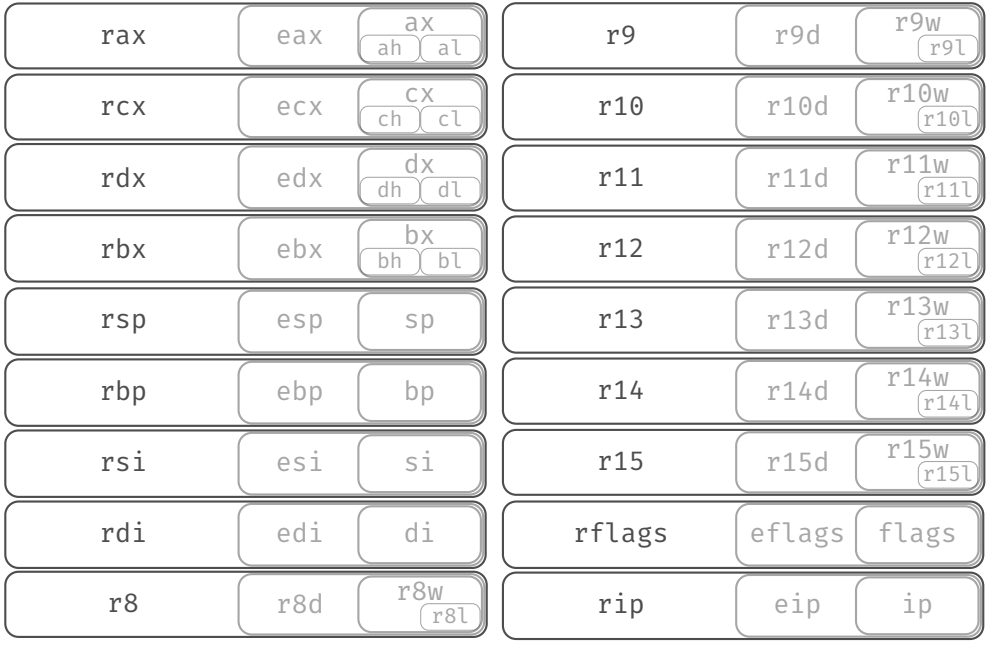
Kontextsicherung gemäß Konvention

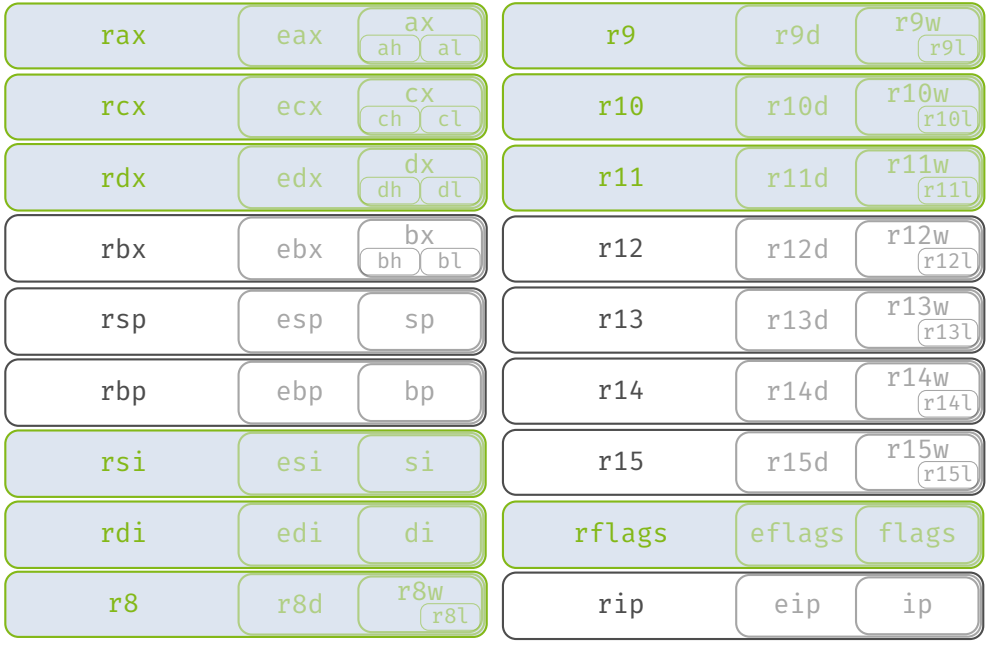
```
void baz(){
  ...

  // flüchtige Register
  // sichern

  func();

  // flüchtige Register
  // wiederherstellen

  ...
}
```

```
void func(){
  // nicht-flüchtige
  // Register
  // sichern

  ...

  // nicht-flüchtige
  // Register
  // wiederherstellen

  return;
}
```

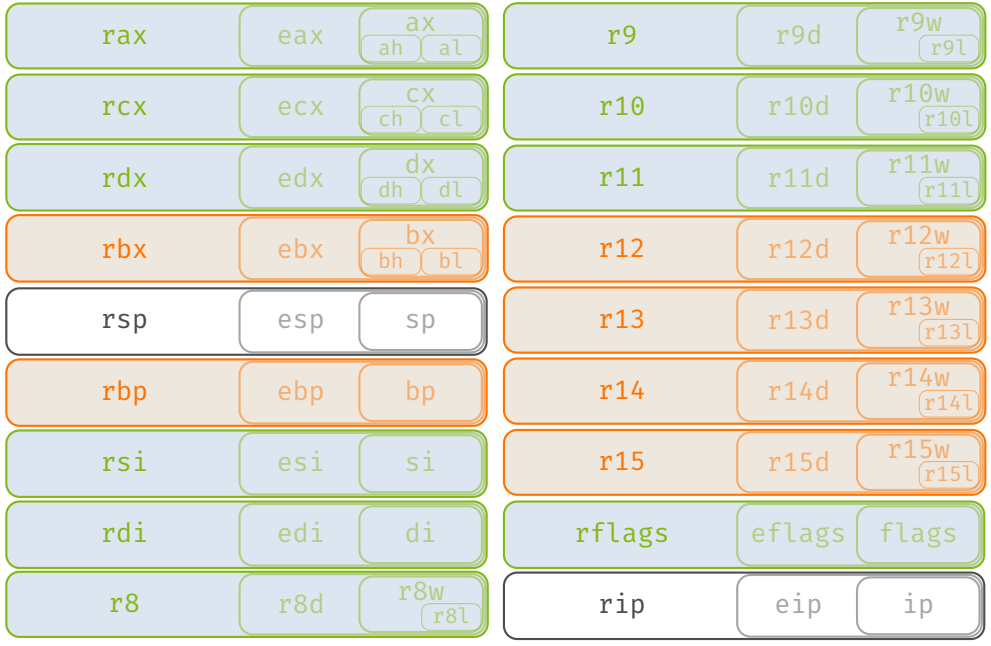

rax
eax
ax
ah
al
rcx
ecx
cx
ch
cl
rdx
edx
dx
dh
dl
rbx
ebx
bx
bh
bl
rsp
esp
sp
rbp
ebp
bp
rsi
esi
si
rdi
edi
di
r8
r8d
r8w
r8l
r9
r9d
r9w
r9l
r10
r10d
r10w
r10l
...
r15
r15d
r15w
r15l
cs
ds
ss
es
fs
gs
+ 16× SSE Register (XMM, 128 bit)
+ Kontrollregister + Debugregister
rflags
eflags
flags
rip
eip
ip


rax
eax
ax
ah
al
rcx
ecx
cx
ch
cl
rdx
edx
dx
dh
dl
rbx
ebx
bx
bh
bl
rsp
esp
sp
rbp
ebp
bp
rsi
esi
si
rdi
edi
di
r8
r8d
r8w
r8l
r9
r9d
r9w
r9l
r10
r10d
r10w
r10l
...
r15
r15d
r15w
r15l
rflags
eflags
flags
rip
eip
ip


rax
eax
ax
ah
al
rcx
ecx
cx
ch
cl
rdx
edx
dx
dh
dl
rbx
ebx
bx
bh
bl
rsp
esp
sp
rbp
ebp
bp
rsi
esi
si
rdi
edi
di
r8
r8d
r8w
r8l
r9
r9d
r9w
r9l
r10
r10d
r10w
r10l
r11
r11d
r11w
r11l
r12
r12d
r12w
r12l
r13
r13d
r13w
r13l
r14
r14d
r14w
r14l
r15
r15d
r15w
r15l
rflags
eflags
flags
rip
eip
ip

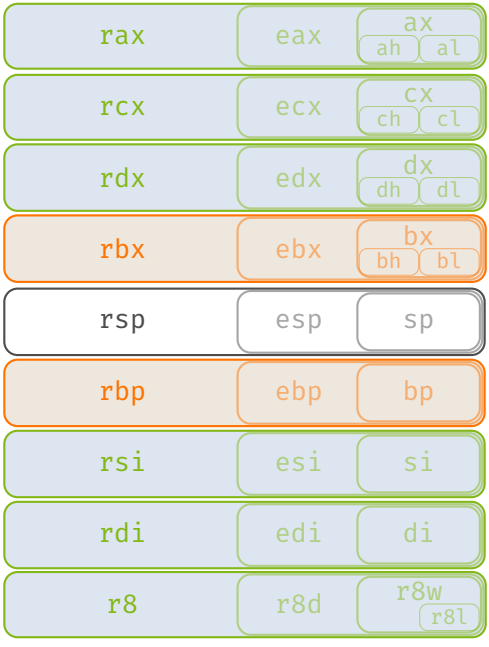


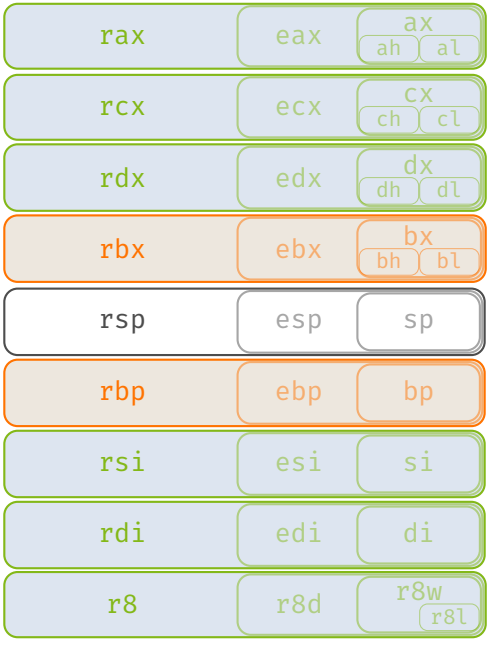
flüchtige (*scratch* / *caller-save*) Register


rax
eax
ax
ah
al
rcx
ecx
cx
ch
cl
rdx
edx
dx
dh
dl
rbx
ebx
bx
bh
bl
rsp
esp
sp
rbp
ebp
bp
rsi
esi
si
rdi
edi
di
r8
r8d
r8w
r8l
r9
r9d
r9w
r9l
r10
r10d
r10w
r10l
r11
r11d
r11w
r11l
r12
r12d
r12w
r12l
r13
r13d
r13w
r13l
r14
r14d
r14w
r14l
r15
r15d
r15w
r15l
rflags
eflags
flags
rip
eip
ip
flüchtige (scratch / caller-save) Register
nicht-flüchtig (non-scratch / callee-save)

Wieso nicht gleich die **flüchtigen Register** beim Funktionsaufruf nutzen?

Bild: twemoji


rax
eax
ax
ah
al
rcx
ecx
cx
ch
cl
rdx
edx
dx
dh
dl
rbx
ebx
bx
bh
bl
rsp
esp
sp
rbp
ebp
bp
rsi
esi
si
rdi
edi
di
r8
r8d
r8w
r8l



Rückgabewert

4. Parameter

3. Parameter

2. Parameter

1. Parameter

5. Parameter

Parameterübergabe gemäß Konvention

```
int i = func(23, 42);
```

Parameterübergabe gemäß Konvention

```c
int i = func(23, 42);
```

```
; ggf. Register Sicherung
push r9
; 2. Parameter in Register rsi
mov esi, 0x2a
; 1. Parameter in Register rdi
mov edi, 0x17
; Funktionsaufruf
call func
```

Parameterübergabe gemäß Konvention

```c
int i = func(23, 42);
```

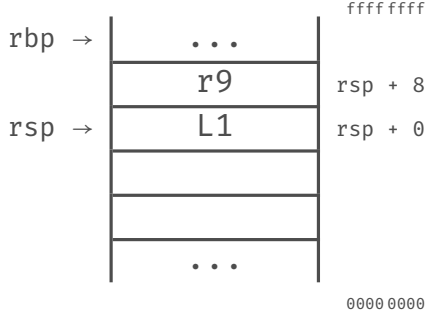
```
  ; ggf. Register Sicherung
  push r9
  ; 2. Parameter in Register rsi
  mov esi, 0x2a
  ; 1. Parameter in Register rdi
  mov edi, 0x17
  ; Funktionsaufruf
  call func
  ; pushed implizit die
  ; Rücksprungadresse
L1:
```

Parameterübergabe gemäß Konvention

```
int i = func(23, 42);
```

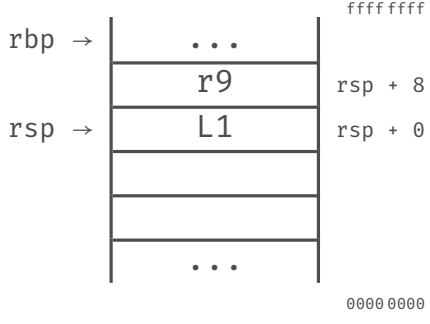
```
  ; ggf. Register Sicherung
  push r9
  ; 2. Parameter in Register rsi
  mov esi, 0x2a
  ; 1. Parameter in Register rdi
  mov edi, 0x17
  ; Funktionsaufruf
  call func
  ; pushed implizit die
  ; Rücksprungadresse
L1:
```

Stack beim Funktionsaufruf:



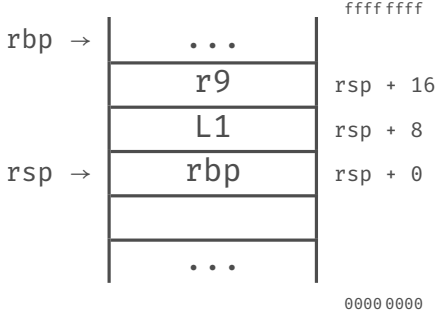
Parameterübergabe gemäß Konvention

```
func:
```



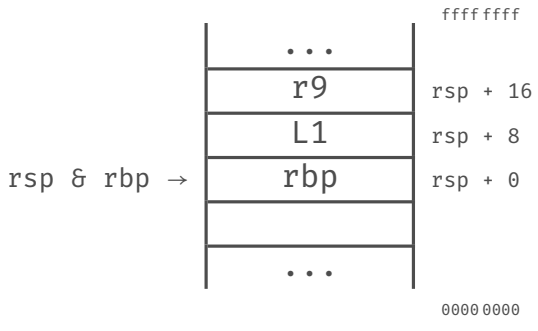
Parameterübergabe gemäß Konvention

```
func:

  ; alten Rahmenzeiger sichern
  push rbp
```



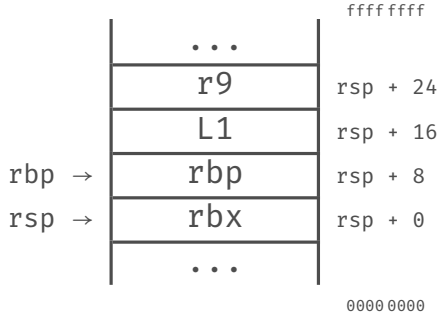
Parameterübergabe gemäß Konvention

```
func:

  ; alten Rahmenzeiger sichern
  push rbp
  ; aktuellen Rahmenzeiger setzen
  mov rbp, rsp
```



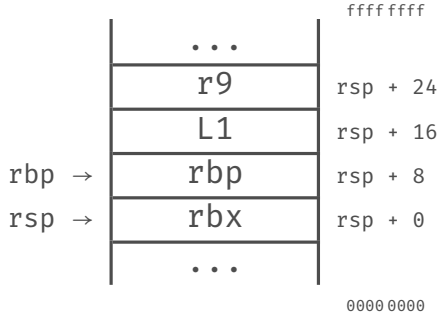
Parameterübergabe gemäß Konvention

```
func:

  ; alten Rahmenzeiger sichern
  push rbp
  ; aktuellen Rahmenzeiger setzen
  mov rbp, rsp
  ; ggf. weitere Register sichern
  push rbx
```



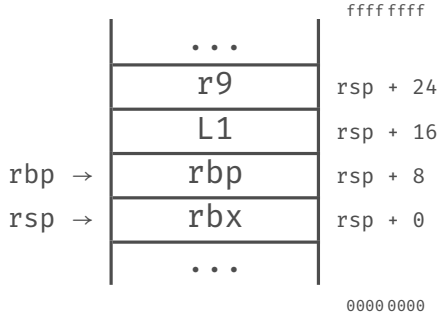
Parameterübergabe gemäß Konvention

```
func:

  ; alten Rahmenzeiger sichern
  push rbp
  ; aktuellen Rahmenzeiger setzen
  mov rbp, rsp
  ; ggf. weitere Register sichern
  push rbx

  ...
```



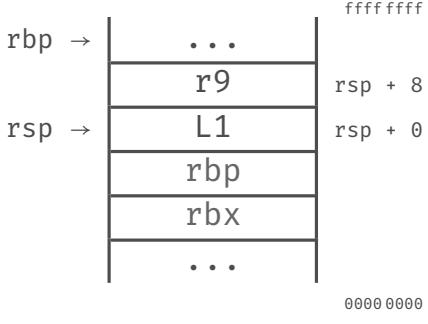
Parameterübergabe gemäß Konvention

```
func:

  ; alten Rahmenzeiger sichern
  push rbp
  ; aktuellen Rahmenzeiger setzen
  mov rbp, rsp
  ; ggf. weitere Register sichern
  push rbx

  ...

  ; Rückgabewert nach rax
  mov eax, 0xd
```



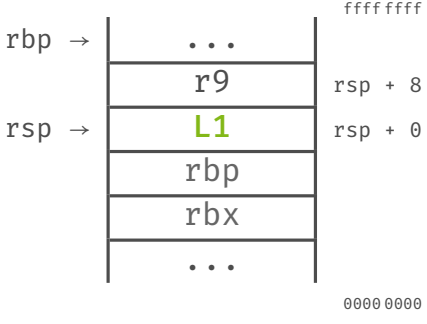
Parameterübergabe gemäß Konvention

```
func:

  ; alten Rahmenzeiger sichern
  push rbp
  ; aktuellen Rahmenzeiger setzen
  mov rbp, rsp
  ; ggf. weitere Register sichern
  push rbx

  ...

  ; Rückgabewert nach rax
  mov eax, 0xd
  ; Register wiederherstellen
  pop rbx
  pop rbp
```



Parameterübergabe gemäß Konvention

```
func:

  ; alten Rahmenzeiger sichern
  push rbp
  ; aktuellen Rahmenzeiger setzen
  mov rbp, rsp
  ; ggf. weitere Register sichern
  push rbx

  ...

  ; Rückgabewert nach rax
  mov eax, 0xd
  ; Register wiederherstellen
  pop rbx
  pop rbp
  ; Rücksprung
  ret
```

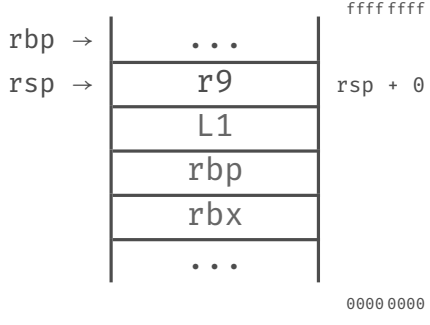


Parameterübergabe gemäß Konvention

```
int i = func(23, 42);
```

```
  ; ggf. Register Sicherung
  push r9
  ; 2. Parameter in Register rsi
  mov esi, 0x2a
  ; 1. Parameter in Register rdi
  mov edi, 0x17
  ; Funktionsaufruf
  call func
  ; pushed implizit die
  ; Rücksprungadresse
L1:
```

Stack nach Funktionsaufruf:

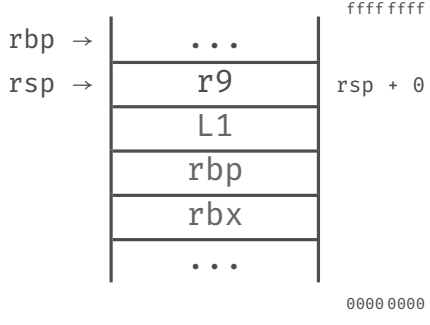


Parameterübergabe gemäß Konvention

```
int i = func(23, 42);
```

```
  ; ggf. Register Sicherung
  push r9
  ; 2. Parameter in Register rsi
  mov esi, 0x2a
  ; 1. Parameter in Register rdi
  mov edi, 0x17
  ; Funktionsaufruf
  call func
  ; pushed implizit die
  ; Rücksprungadresse
L1:
  ; Rückgabewert in rax
  mov rsi, rax
```

Stack nach Funktionsaufruf:

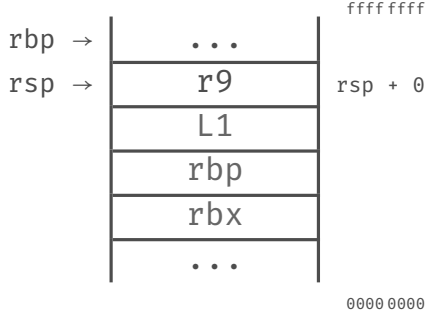


Parameterübergabe gemäß Konvention

```
int i = func(23, 42);
```

```
  ; ggf. Register Sicherung
  push r9
  ; 2. Parameter in Register rsi
  mov esi, 0x2a
  ; 1. Parameter in Register rdi
  mov edi, 0x17
  ; Funktionsaufruf
  call func
  ; pushed implizit die
  ; Rücksprungadresse
L1:
  ; Rückgabewert in rax
  mov rsi, rax
  ; ggf. Register wiederherstellen
  pop r9
```

Stack nach Funktionsaufruf:



Umsetzung des Kontextwechsel

Umschaltung

```
void foo(){
  int f = 42;

  while (f--){
    kout << "foo"
         << f
         << endl;
    context_switch(
        &stack_foo,
        &stack_bar
      );
  }
}
```

```
void bar(){
  int b = 23;

  while (b--){
    kout << "bar"
         << b
         << endl;
    context_switch(
        &stack_bar,
        &stack_foo
      );
  }
}
```

Umschaltung im Detail

Kontrollflusszustand sichern & laden

Notwendige **Schritte** in `context_switch`:

Umschaltung im Detail

Kontrollflusszustand sichern & laden

Notwendige **Schritte** in `context_switch`:

1. Register sichern

Umschaltung im Detail

Kontrollflusszustand sichern & laden

Notwendige **Schritte** in `context_switch`:

1. Register sichern (*via Stack*)

Umschaltung im Detail

Kontrollflusszustand sichern & laden

Notwendige **Schritte** in `context_switch`:

1. Register sichern (*via Stack*)
2. Stackpointer (`rsp`) sichern

Umschaltung im Detail

Kontrollflusszustand sichern & laden

Notwendige **Schritte** in `context_switch`:

1. Register sichern (*via Stack*)
2. Stackpointer (`rsp`) sichern
3. Stackpointer (`rsp`) laden

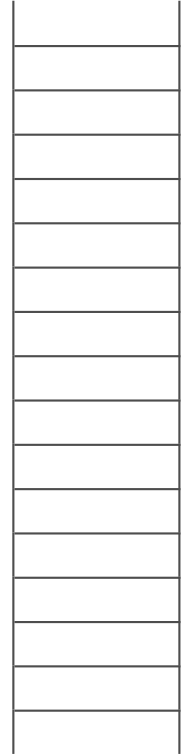
Umschaltung im Detail

Kontrollflusszustand sichern & laden

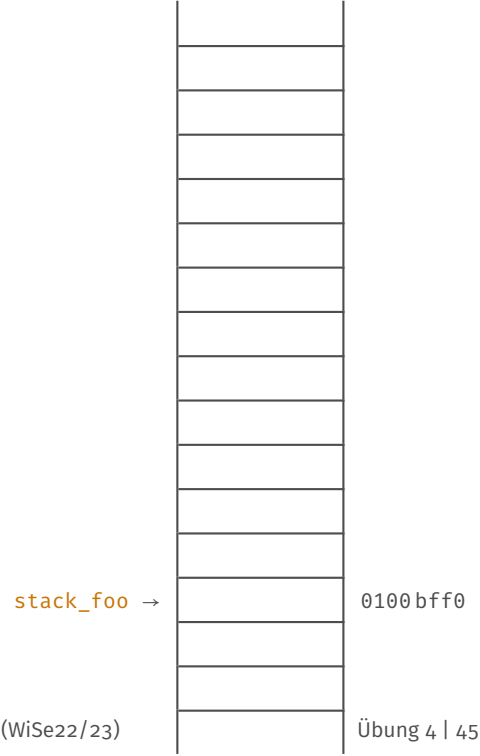
Notwendige **Schritte** in `context_switch`:

1. Register sichern (*via Stack*)
2. Stackpointer (`rsp`) sichern
3. Stackpointer (`rsp`) laden
4. Register wiederherstellen

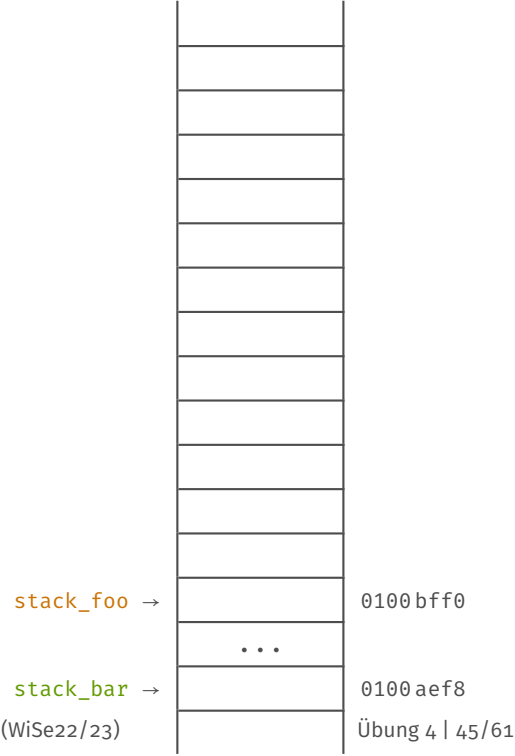
```
// Global sichtbar:

struct StackPointer {
  void *kernel;

  // Später auch User-
  // Stackpointer (in BST)
};
```



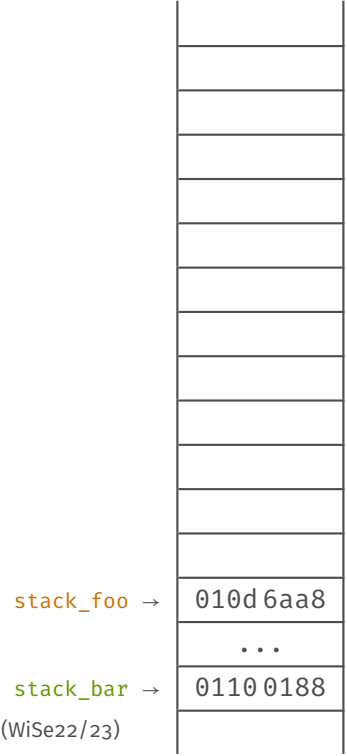
```
// Global sichtbar:

struct StackPointer {
  void *kernel;

  // Später auch User-
  // Stackpointer (in BST)
};

StackPointer stack_foo;
```



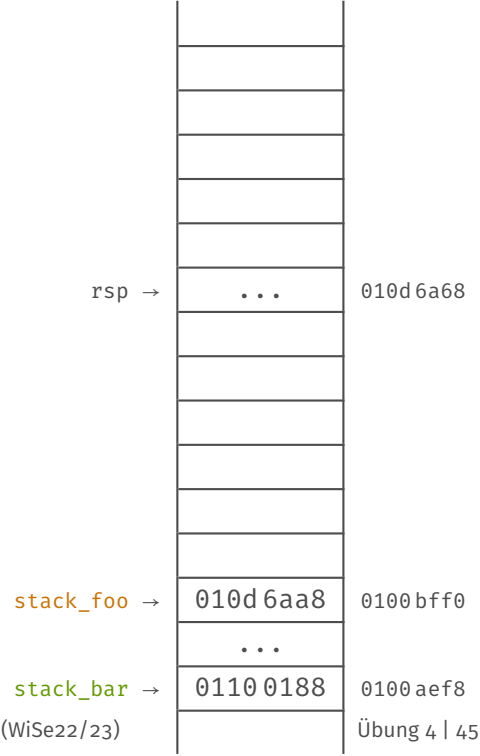
```
// Global sichtbar:

struct StackPointer {
  void *kernel;

  // Später auch User-
  // Stackpointer (in BST)
};

StackPointer stack_foo;

StackPointer stack_bar;
```



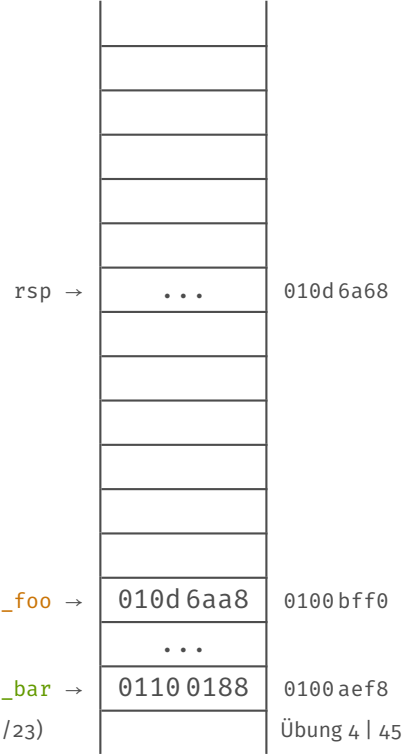
```
// Global sichtbar:

struct StackPointer {
  void *kernel;

  // Später auch User-
  // Stackpointer (in BST)
};

StackPointer stack_foo;

StackPointer stack_bar;

// Sinnvoll initialisieren
// (mehr dazu später...)
```



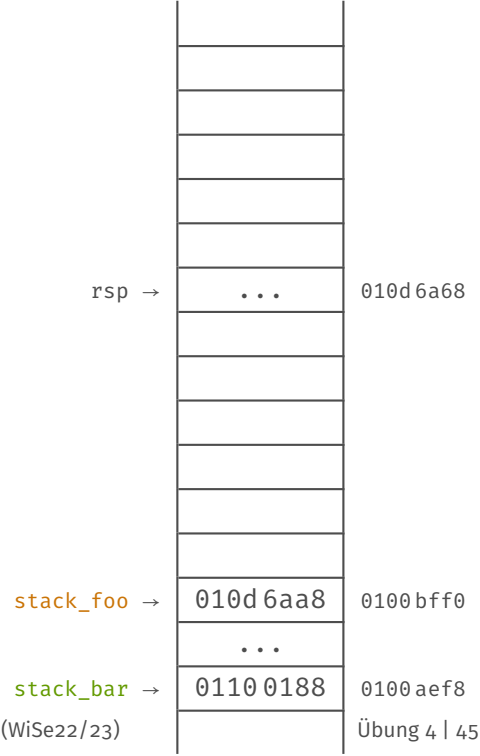
```
void foo(){
  ...



  context_switch(
      &stack_foo,
      &stack_bar
    );


  ...
```



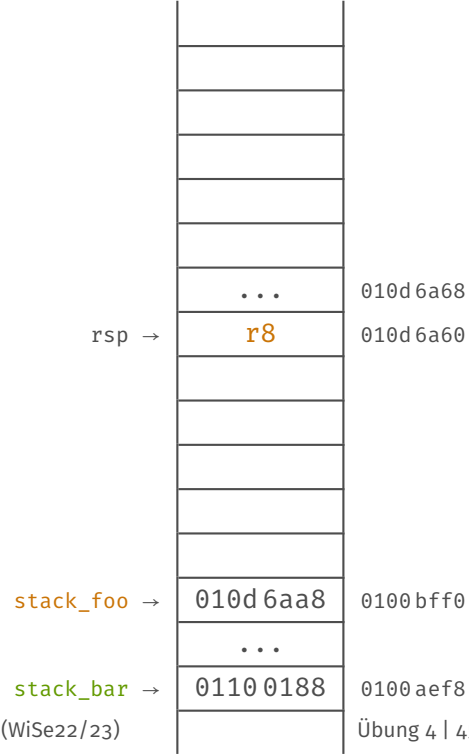
```
void foo(){
  ...

  // Sicherung der
  // flüchtigen Register
  // von Kontext foo


  context_switch(
      &stack_foo,
      &stack_bar
    );


  ...
```



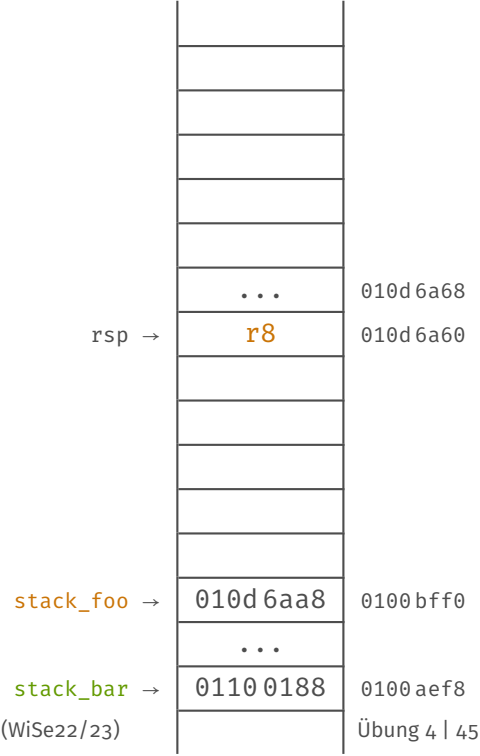
```
void foo(){
  ...

  // Sicherung der
  // flüchtigen Register
  // von Kontext foo
  // durch Übersetzer


  context_switch(
      &stack_foo,
      &stack_bar
    );


  ...
```



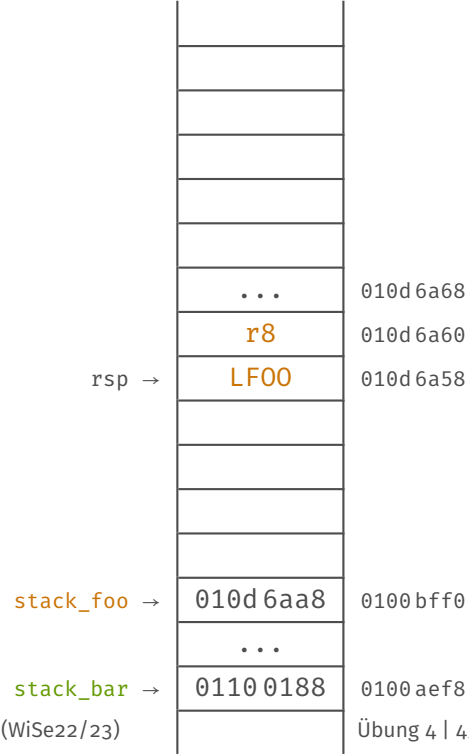
```
void foo(){
  ...

  // Sicherung der
  // flüchtigen Register
  // von Kontext foo
  // durch Übersetzer
  // (z.B. r8)

  context_switch(
      &stack_foo,
      &stack_bar
    );


  ...
```



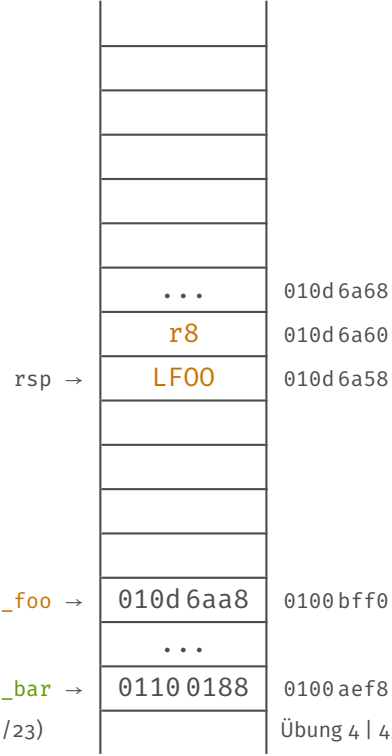
```
void foo(){
  ...

  // Sicherung der
  // flüchtigen Register
  // von Kontext foo
  // durch Übersetzer
  // (z.B. r8)

  context_switch(
      &stack_foo,
      &stack_bar
    );


  ...
```



```
void foo(){
  ...

  // Sicherung der
  // flüchtigen Register
  // von Kontext foo
  // durch Übersetzer
  // (z.B. r8)

  context_switch(
      &stack_foo,
      &stack_bar
    );
LFOO:

  ...
```

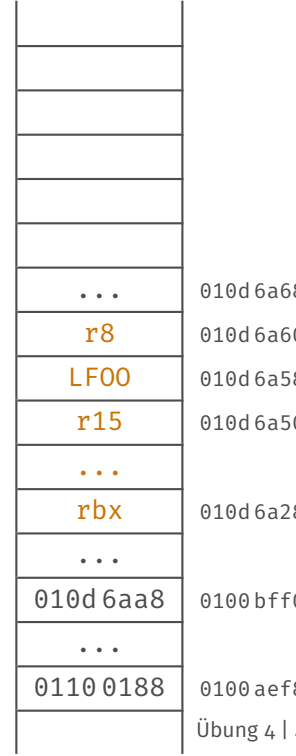


```
context_switch:
```

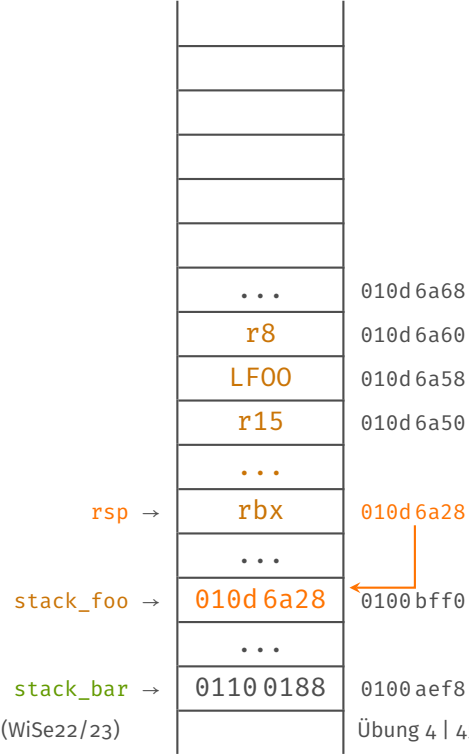



```
  ret
```

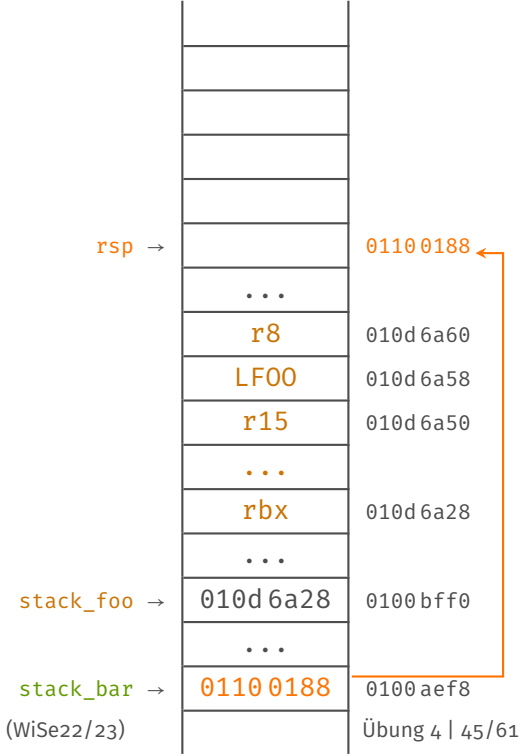
```
context_switch:

  ;; nicht-flüchtige
  ;; Register von
  ;; foo sichern

  ret
```



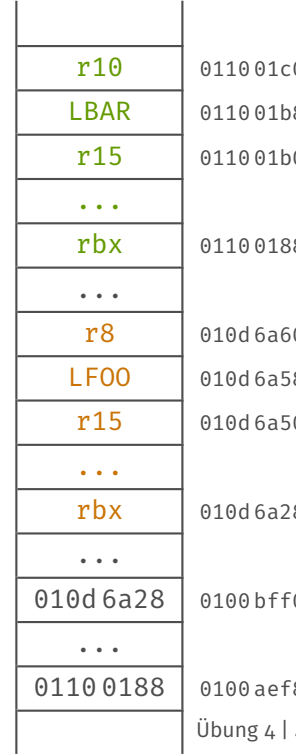
```
context_switch:

  ;; nicht-flüchtige
  ;; Register von
  ;; foo sichern

  ;; Stackzeiger von
  ;; foo sichern

  ret
```



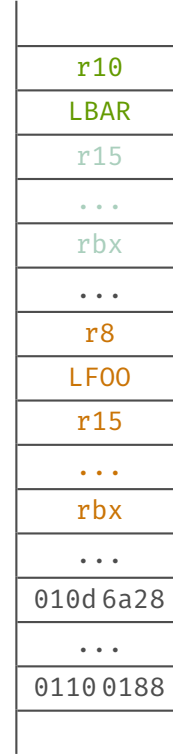
```
context_switch:

  ;; nicht-flüchtige
  ;; Register von
  ;; foo sichern

  ;; Stackzeiger von
  ;; foo sichern

  ;; Stackzeiger von
  ;; bar laden

  ret
```



```
context_switch:

  ;; nicht-flüchtige
  ;; Register von
  ;; foo sichern

  ;; Stackzeiger von
  ;; foo sichern

  ;; Stackzeiger von
  ;; bar laden

  ret
```

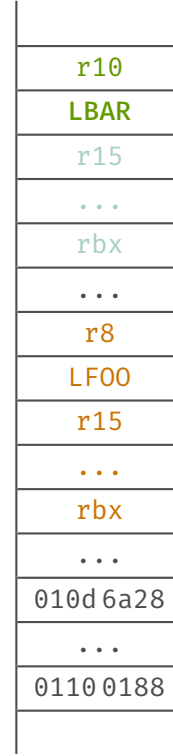


```
context_switch:

  ;; nicht-flüchtige
  ;; Register von
  ;; foo sichern

  ;; Stackzeiger von
  ;; foo sichern

  ;; Stackzeiger von
  ;; bar laden

  ;; nicht-flüchtige
  ;; Register von
  ;; bar laden

  ret
```

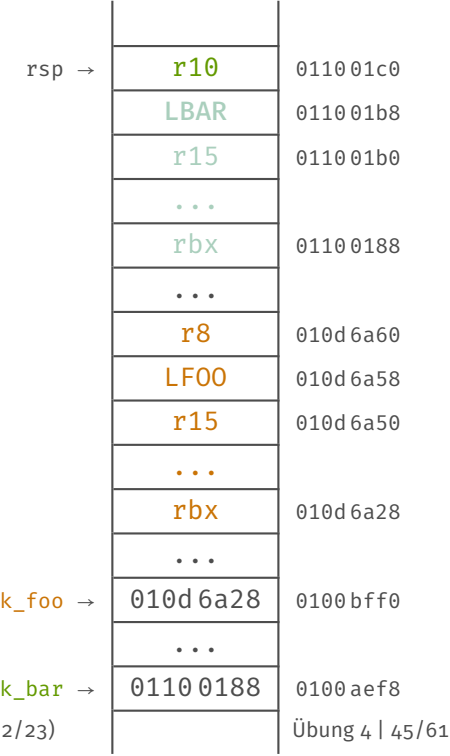


0110 01c0
0110 01b8
0110 01b0
0110 0188
010d 6a60
010d 6a58
010d 6a50
010d 6a28
0100 bff0
0100 aef8

```
context_switch:

  ;; nicht-flüchtige
  ;; Register von
  ;; foo sichern

  ;; Stackzeiger von
  ;; foo sichern

  ;; Stackzeiger von
  ;; bar laden

  ;; nicht-flüchtige
  ;; Register von
  ;; bar laden

  ret
```

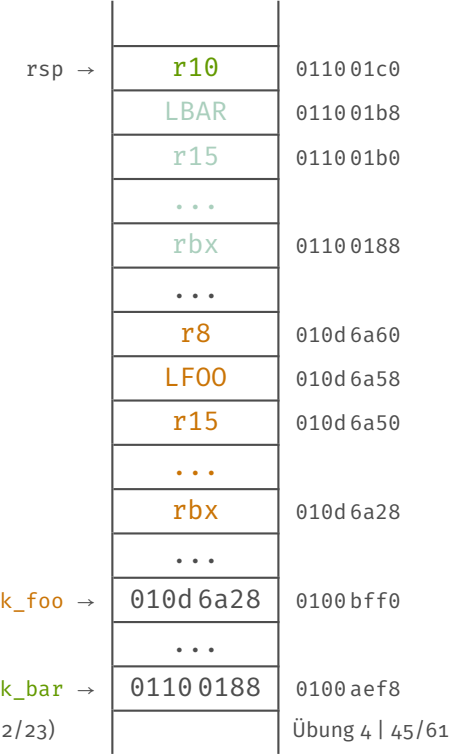


```
void bar(){
  ...

  context_switch(
      &stack_bar,
      &stack_foo
    );
LBAR:
```




```
  ...
```

```
void bar(){
  ...

  context_switch(
      &stack_bar,
      &stack_foo
    );
LBAR:

  // Wiederhestellen der
  // flüchtigen Register
  // von Kontext bar
  // durch Übersetzer
  // (z.B. r10)

  ...
```



Koroutine (erstmalig) starten

Wie rufe ich die Koroutine erstmalig auf?

Ziel: Instruktionszeiger `rip` ändern

Koroutine (erstmalig) starten

Wie rufe ich die Koroutine erstmalig auf?

Ziel: Instruktionszeiger `rip` ändern

Problem: Register `rip` kann nicht direkt beschrieben werden

Koroutine (erstmalig) starten

Wie rufe ich die Koroutine erstmalig auf?

Ziel: Instruktionszeiger `rip` ändern

Problem: Register `rip` kann nicht direkt beschrieben werden

Lösung: Zieladresse auf Stack und `ret` ändert `rip`

Koroutine (erstmalig) starten

Wie rufe ich die Koroutine erstmalig auf?

Ziel: Instruktionszeiger `rip` ändern

Problem: Register `rip` kann nicht direkt beschrieben werden

Lösung: Zieladresse auf Stack und `ret` ändert `rip`
→ `context_switch` mit entsprechenden Stack

Koroutine (erstmalig) starten

Wie rufe ich die Koroutine erstmalig auf?

Ziel: Instruktionszeiger `rip` ändern

Problem: Register `rip` kann nicht direkt beschrieben werden

Lösung: Zieladresse auf Stack und `ret` ändert `rip`
→ `context_switch` mit entsprechenden Stack

Wie rufe ich die aller erste Koroutine auf?

Koroutine (erstmalig) starten

Wie rufe ich die Koroutine erstmalig auf?

Ziel: Instruktionszeiger `rip` ändern

Problem: Register `rip` kann nicht direkt beschrieben werden

Lösung: Zieladresse auf Stack und `ret` ändert `rip`
→ `context_switch` mit entsprechenden Stack

Wie rufe ich die aller erste Koroutine auf?

- `context_go` mit nur einem Parameter

Koroutine (erstmalig) starten

Wie rufe ich die Koroutine erstmalig auf?

Ziel: Instruktionszeiger `rip` ändern

Problem: Register `rip` kann nicht direkt beschrieben werden

Lösung: Zieladresse auf Stack und `ret` ändert `rip`
→ `context_switch` mit entsprechenden Stack

Wie rufe ich die aller erste Koroutine auf?

- `context_go` mit nur einem Parameter

Was wird für jede Koroutine gebraucht?

Koroutine (erstmalig) starten

Wie rufe ich die Koroutine erstmalig auf?

Ziel: Instruktionszeiger `rip` ändern

Problem: Register `rip` kann nicht direkt beschrieben werden

Lösung: Zieladresse auf Stack und `ret` ändert `rip`
→ `context_switch` mit entsprechenden Stack

Wie rufe ich die aller erste Koroutine auf?

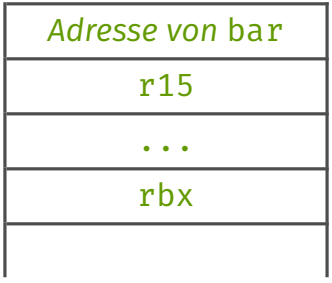
- `context_go` mit nur einem Parameter

Was wird für jede Koroutine gebraucht?

- eigener, präparierter Stack
- Speicher für Stackzeiger (`struct StackPointer`)

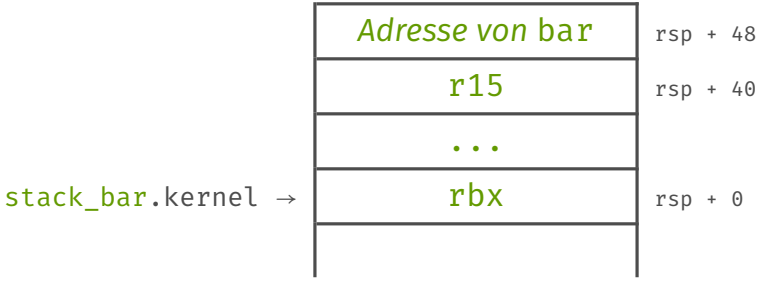
Stack aufsetzen

Stack für Einsprung in Koroutine `void bar()`



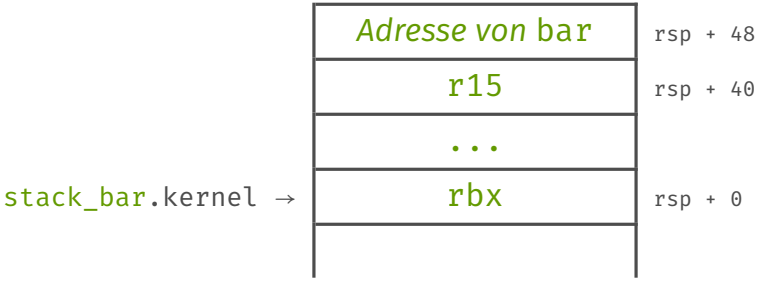
Stack aufsetzen

Stack für Einsprung in Koroutine `void bar()`



Stack aufsetzen

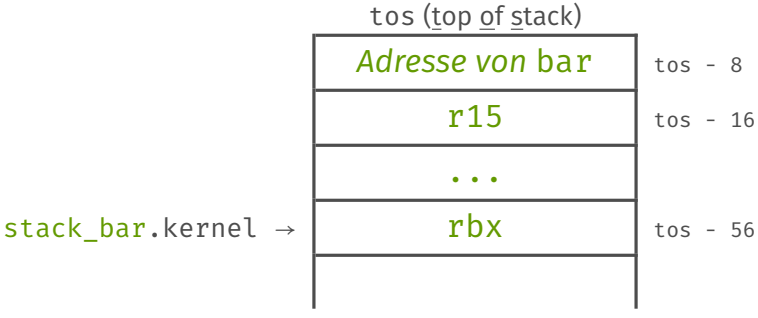
Stack für Einsprung in Koroutine `void bar()`




```
#define STACKSIZE 4096
char stackBar[STACKSIZE];
void* tos = stackFoo + STACKSIZE;
```

Stack aufsetzen

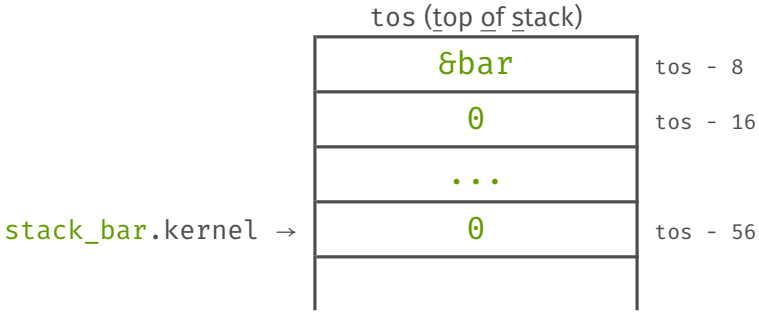
Stack für Einsprung in Koroutine `void bar()`




```
#define STACKSIZE 4096
char stackBar[STACKSIZE];
void* tos = stackFoo + STACKSIZE;
```

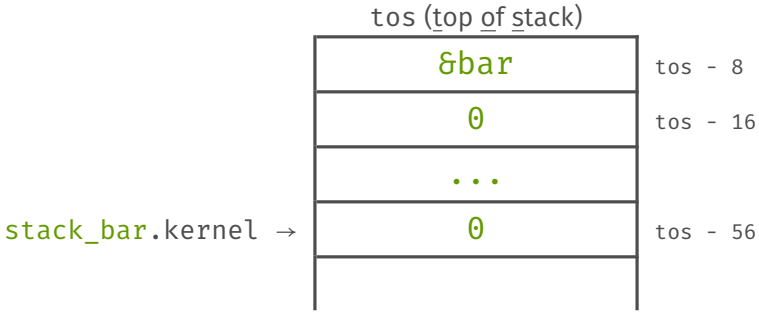
Stack aufsetzen

Stack für Einsprung in Koroutine `void bar()`



Stack aufsetzen

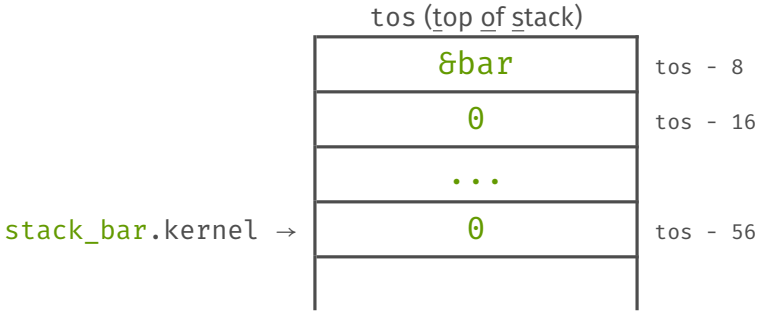
Stack für Einsprung in Koroutine `void bar()`



Was passiert nun bei `context_switch`?

Stack aufsetzen

Stack für Einsprung in Koroutine `void bar()`



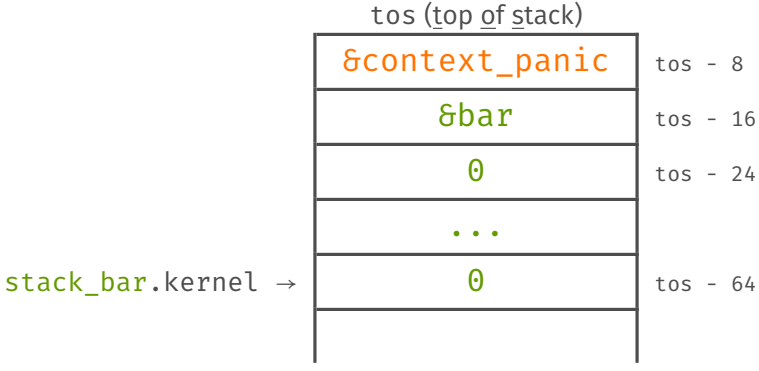
Was passiert, wenn die Koroutine `bar` abgearbeitet ist?

Stack aufsetzen (Robust)

```
void panic() {
  kernelpanic("Application should not return!1!!11");
}
```

Stack aufsetzen (Robust)

```
void panic() {
  kernelpanic("Application should not return!1!!11");
}
```



Stack aufsetzen mit Funktionsparameter

Stack für Einsprung in Koroutine `void bar(int i)`

Stack aufsetzen mit Funktionsparameter

Stack für Einsprung in Koroutine `void bar(int i)` unter Verwendung einer zusätzlichen Hilfsfunktion – z.B. `bar_wrapper`

Stack aufsetzen mit Funktionsparameter

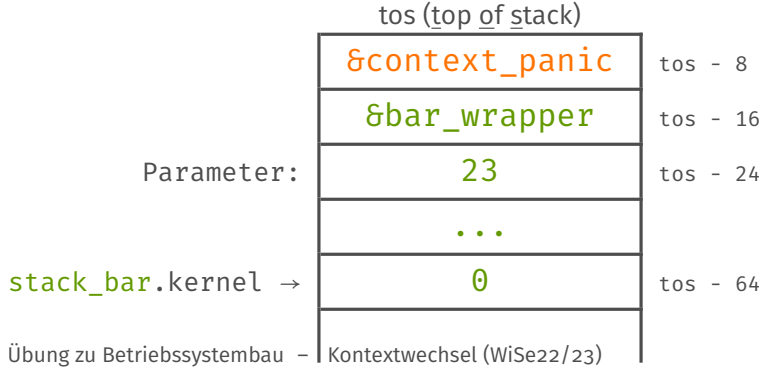
Stack für Einsprung in Koroutine `void bar(int i)` unter Verwendung einer zusätzlichen Hilfsfunktion – z.B. `bar_wrapper`

- liest Parameter aus nicht-flüchtigem Register (`r15`)
- schreibt Wert in flüchtiges Parameterregister (`rdi`)
- springt in eigentliche Funktion (`bar`)

Stack aufsetzen mit Funktionsparameter

Stack für Einsprung in Koroutine `void bar(int i)` unter Verwendung einer zusätzlichen Hilfsfunktion – z.B. `bar_wrapper`

- liest Parameter aus nicht-flüchtigem Register (`r15`)
- schreibt Wert in flüchtiges Parameterregister (`rdi`)
- springt in eigentliche Funktion (`bar`)



Umsetzung in OOStuBS/MPStuBS

Threads

```
class Thread {
    StackPointer sp;
  public:
    Thread();
    virtual void action() = 0;
};
```

Threads

```
class Thread {
    StackPointer sp;
  public:
    Thread();
    virtual void action() = 0;
};
```

Adresse einer virtuellen Member-Funktion nicht (einfach) ermittelbar

Threads

```
class Thread {
    StackPointer sp;
  public:
    Thread();
    virtual void action() = 0;
};
```

Adresse einer virtuellen Member-Funktion nicht (einfach) ermittelbar

```
Thread * x = &app;
x->action(); // Foo::action oder Bar::action ?
```

```
class Foo : public Thread {
  void action() { ... }
};
```

```
class Bar : public Thread {
  void action() { ... }
};
```

Threads

```
class Thread {
    StackPointer sp;
  public:
    Thread();
    virtual void action() = 0;
};
```

Adresse einer virtuellen Member-Funktion nicht (einfach) ermittelbar

```
void kickoff(Thread* t){
  t->action();
}
```

Threads: Stack aufsetzen

```
void * prepareContext(void * tos,
                      void (*kickoff)(void*),
                      void * param);
```

Präpariert einen Stack für den ersten Einsprung

Threads: Stack aufsetzen

```
void * prepareContext(void * tos,
                      void (*kickoff)(void*),
                      void * param);
```

Präpariert einen Stack für den ersten Einsprung

- statisch reservierten Speicher `tos` als Stack aufsetzen

Threads: Stack aufsetzen

```
void * prepareContext(void * tos,
                      void (*kickoff)(void*),
                      void * param);
```

Präpariert einen Stack für den ersten Einsprung

- statisch reservierten Speicher `tos` als Stack aufsetzen
- nach dem Einsprung soll `kickoff` mit `param` aufgerufen werden

Threads: Stack aufsetzen

```
void * prepareContext(void * tos,
                      void (*kickoff)(void*),
                      void * param);
```

Präpariert einen Stack für den ersten Einsprung

- statisch reservierten Speicher `tos` als Stack aufsetzen
- nach dem Einsprung soll `kickoff` mit `param` aufgerufen werden
- Stackpointer `kernel` in Thread entsprechend setzen

Threads: Stack aufsetzen

```
void * prepareContext(void * tos,
                      void (*kickoff)(void*),
                      void * param);
```

Präpariert einen Stack für den ersten Einsprung

- statisch reservierten Speicher `tos` als Stack aufsetzen
- nach dem Einsprung soll `kickoff` mit `param` aufgerufen werden
- Stackpointer `kernel` in Thread entsprechend setzen
- in C++ (statt Assembler)

Threads: Stack aufsetzen

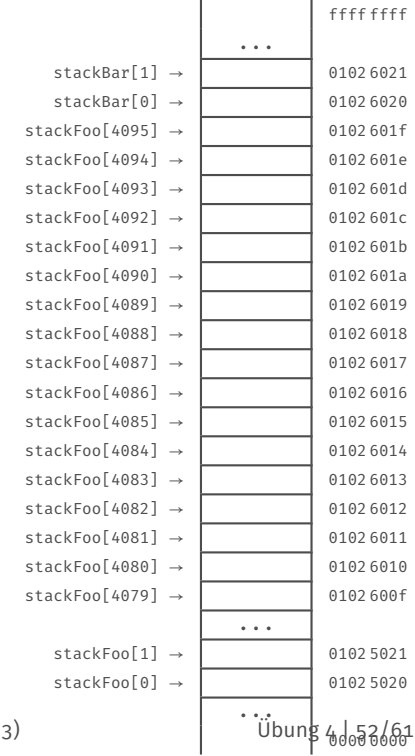
```
void * prepareContext(void * tos,
                      void (*kickoff)(void*),
                      void * param);
```

Präpariert einen Stack für den ersten Einsprung

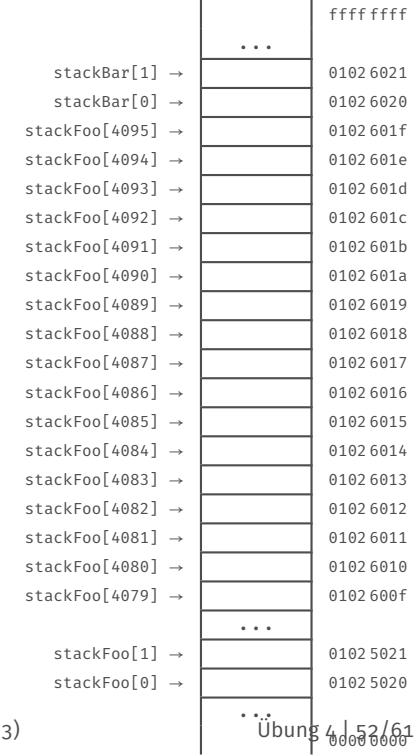
- statisch reservierten Speicher `tos` als Stack aufsetzen
- nach dem Einsprung soll `kickoff` mit `param` aufgerufen werden
- Stackpointer `kernel` in Thread entsprechend setzen
- in C++ (statt Assembler)
- Pointerarithmetik ist hilfreich

```c
#define STACKSIZE 4096
char stackBar[STACKSIZE];
char stackFoo[STACKSIZE];
```

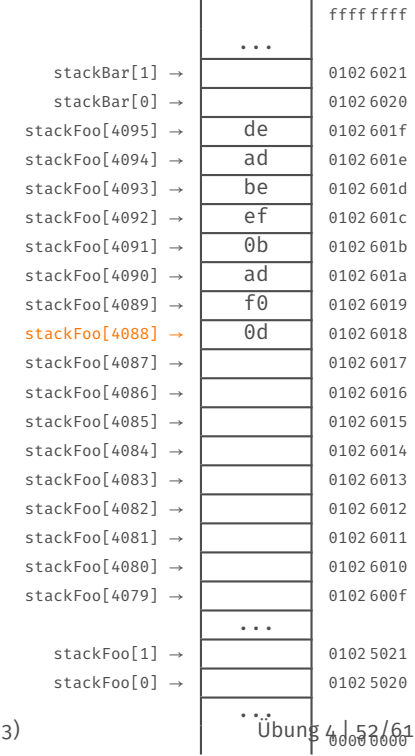
```
#define STACKSIZE 4096
char stackBar[STACKSIZE];
char stackFoo[STACKSIZE];
```



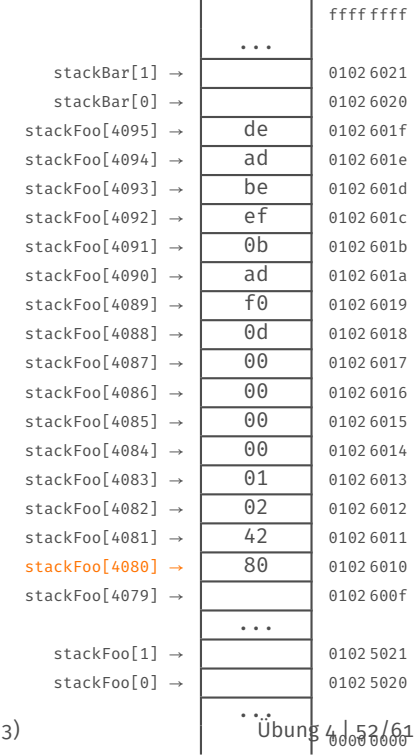
```
#define STACKSIZE 4096
char stackBar[STACKSIZE];
char stackFoo[STACKSIZE];

void* tos = stackFoo + STACKSIZE;
void** rsp = (void**) tos;
```



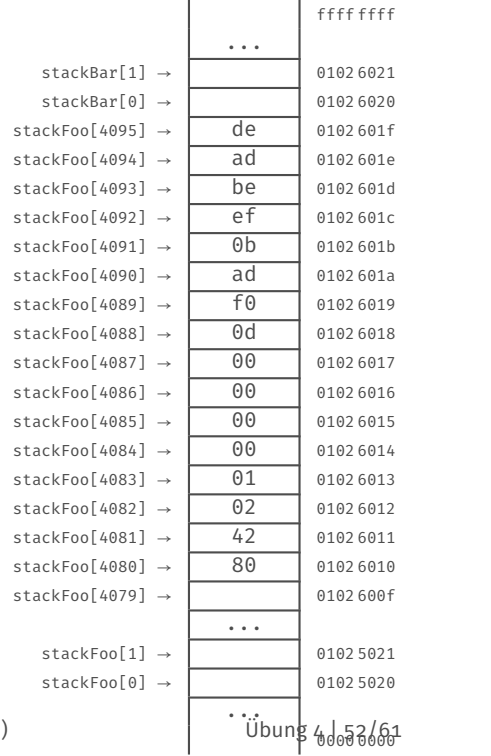
```c
#define STACKSIZE 4096
char stackBar[STACKSIZE];
char stackFoo[STACKSIZE];

void* tos = stackFoo + STACKSIZE;
void** rsp = (void**) tos;

rsp--;
// rsp = &(stackFoo[4088])
*rsp = (void*) 0xdeadbeef0badf00d;
```



```c
#define STACKSIZE 4096
char stackBar[STACKSIZE];
char stackFoo[STACKSIZE];

void* tos = stackFoo + STACKSIZE;
void** rsp = (void**) tos;

rsp--;
// rsp = &(stackFoo[4088])
*rsp = (void*) 0xdeadbeef0badf00d;

rsp--;
// rsp = &(stackFoo[4080])
extern Thread foo;
// &foo = 0x102 4280
*rsp = (void*) &foo;
```



```
#define STACKSIZE 4096
char stackBar[STACKSIZE];
char stackFoo[STACKSIZE];

void* tos = stackFoo + STACKSIZE;
void** rsp = (void**) tos;

rsp--;
// rsp = &(stackFoo[4088])
*rsp = (void*) 0xdeadbeef0badf00d;

rsp--;
// rsp = &(stackFoo[4080])
extern Thread foo;
// &foo = 0x102 4280
*rsp = (void*) &foo;

// ...
```

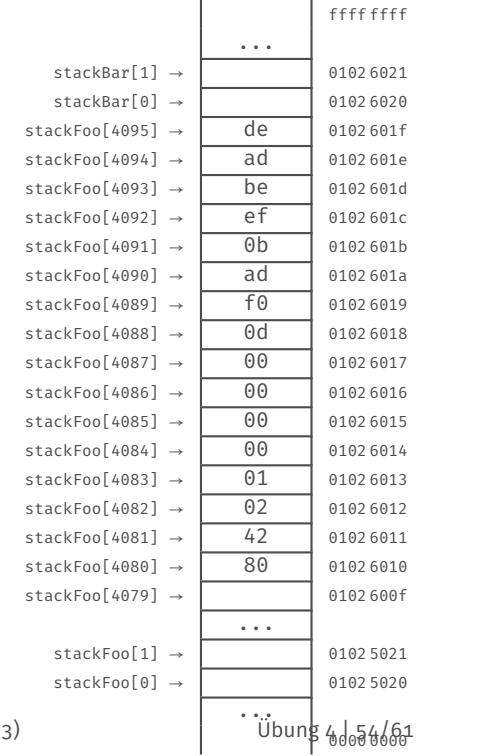


Stapelüberlauf

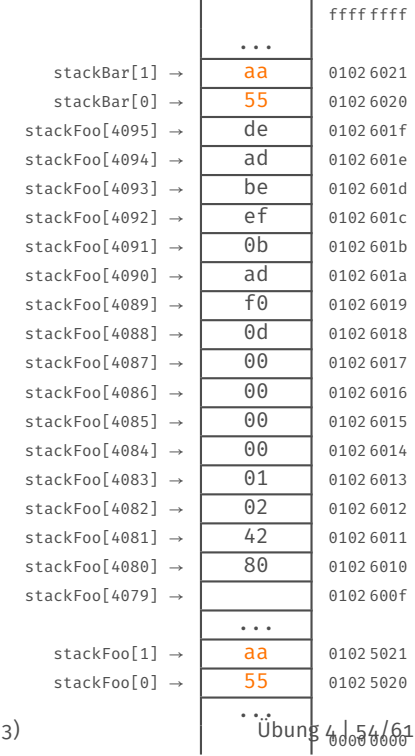
- Die Stacks sind nur 4K groß
- Die Stacks liegen (oft) hintereinander
- Das gilt auch für die initialen Stacks beim Systemstart

→ Mechanismus zum Erkennen von Überlaufen hilfreich („Stack Canary“)

```c
#define STACKSIZE 4096
char stackBar[STACKSIZE];
char stackFoo[STACKSIZE];

void* tos = stackFoo + STACKSIZE;
void** rsp = (void**) tos;

rsp--;
// rsp = &(stackFoo[4088])
*rsp = (void*) 0xdeadbeef0badf00d;

rsp--;
// rsp = &(stackFoo[4080])
extern Thread foo;
// &foo = 0x102 4280
*rsp = (void*) &foo;

// ...
```



```c
#define STACKSIZE 4096
char stackBar[STACKSIZE];
char stackFoo[STACKSIZE];

void* tos = stackFoo + STACKSIZE;
void** rsp = (void**) tos;

rsp--;
// rsp = &(stackFoo[4088])
*rsp = (void*) 0xdeadbeef0badf00d;

rsp--;
// rsp = &(stackFoo[4080])
extern Thread foo;
// &foo = 0x102 4280
*rsp = (void*) &foo;

// ...
```



Scheduler

Scheduler

Zentrale Verwaltung der Koroutinen (Threads)

```
class Scheduler {
    Queue<Thread> readylist;
  public:
    void ready(Thread *);
    void schedule();
    void resume();
    void exit();
    void kill(Thread *);
};
```

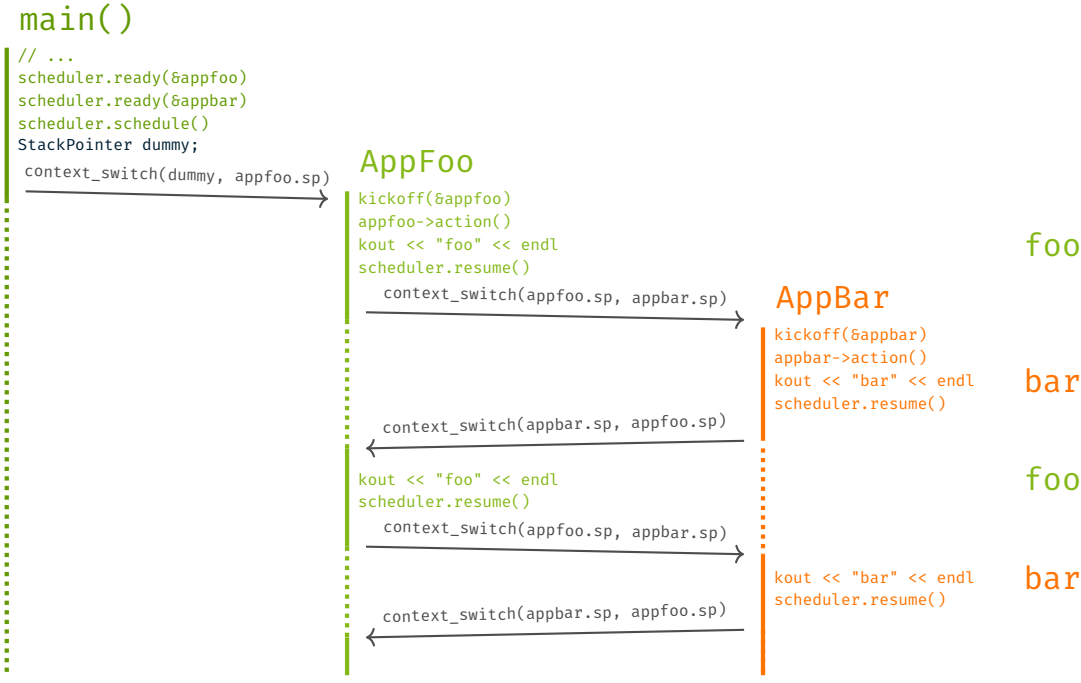
```
// Thread AppFoo
void AppFoo::action(){
  while (1){
    kout << "foo" << endl;
    scheduler.resume();
  }
}
```

```
// Thread AppBar
void AppBar::action(){
  while (1){
    kout << "bar" << endl;
    scheduler.resume();
  }
}
```

```
// Thread AppFoo
void AppFoo::action(){
  while (1){
    kout << "foo" << endl;
    scheduler.resume();
  }
}
```

```
// Thread AppBar
void AppBar::action(){
  while (1){
    kout << "bar" << endl;
    scheduler.resume();
  }
}
```

```
// main.cc
AppFoo appfoo;
AppBar appbar;
int main (){
  // ...
  scheduler.ready(&appfoo);
  scheduler.ready(&appbar);
  scheduler.schedule();
}
```


main()
// ...
scheduler.ready(&appfoo)
scheduler.ready(&appbar)
scheduler.schedule()
StackPointer dummy;
context_switch(dummy, appfoo.sp)
AppFoo
kickoff(&appfoo)
appfoo->action()
kout << "foo" << endl
scheduler.resume()
context_switch(appfoo.sp, appbar.sp)
AppBar
kickoff(&appbar)
appbar->action()
kout << "bar" << endl
scheduler.resume()
context_switch(appbar.sp, appfoo.sp)
kout << "foo" << endl
scheduler.resume()
context_switch(appfoo.sp, appbar.sp)
kout << "bar" << endl
scheduler.resume()
context_switch(appbar.sp, appfoo.sp)
foo
bar
foo
bar

E_0 (Anwendung)

$E_{\frac{1}{2}}$ (Epilog)

E_1 (IRQ/Prolog)

E_0 (Anwendung)

$E_{\frac{1}{2}}$ (Epilog)

E_1 (IRQ/Prolog)

Scheduler

OOStuBS immer synchrone Aufrufe
→ Konsistenz gesichert

Scheduler

OOStuBS immer synchrone Aufrufe
→ Konsistenz gesichert

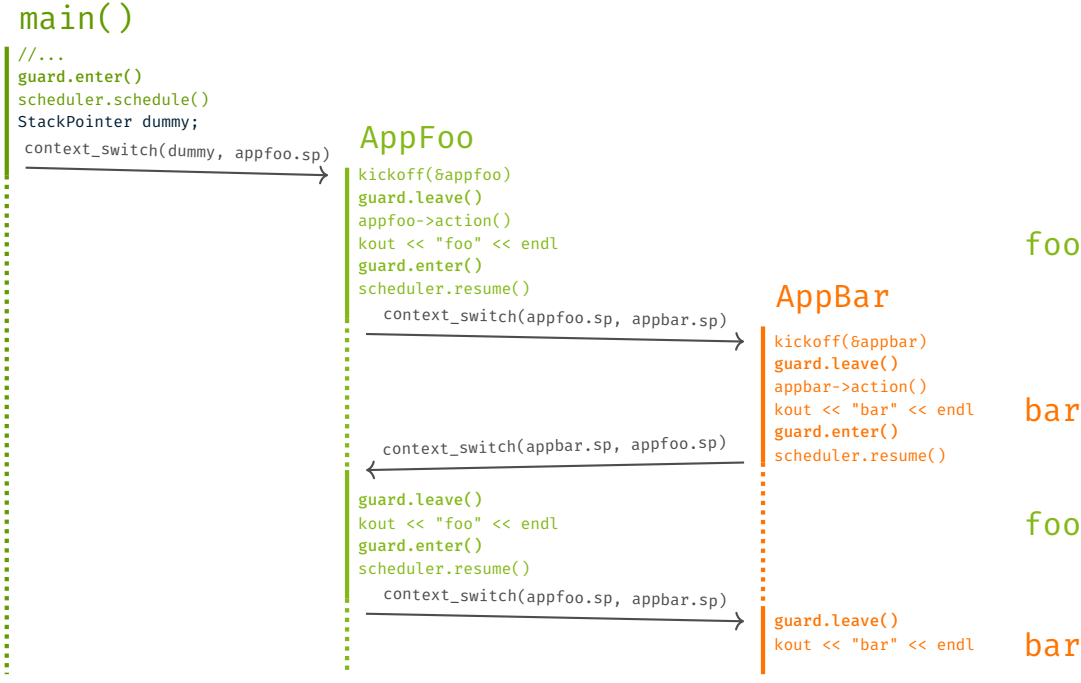
MPStuBS Synchronisation notwendig

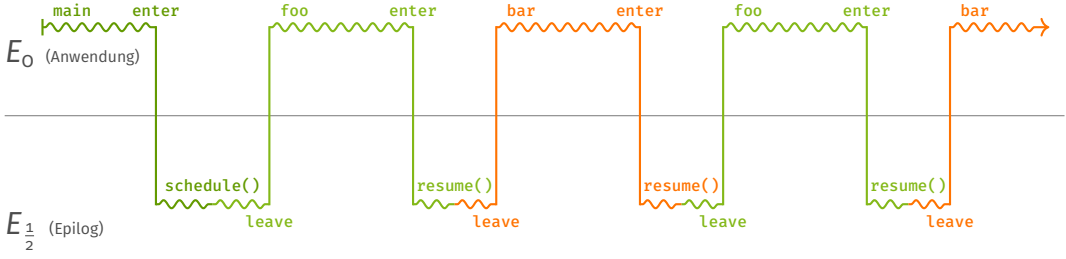
Scheduler

OOStuBS immer synchrone Aufrufe
→ Konsistenz gesichert

MPStuBS Synchronisation notwendig

- Scheduling auf der Epilogebene


main()
//...
guard.enter()
scheduler.schedule()
StackPointer dummy;
context_switch(dummy, appfoo.sp)
AppFoo
kickoff(&appfoo)
guard.leave()
appfoo->action()
kout << "foo" << endl
guard.enter()
scheduler.resume()
foo
context_switch(appfoo.sp, appbar.sp)
AppBar
kickoff(&appbar)
guard.leave()
appbar->action()
kout << "bar" << endl
guard.enter()
scheduler.resume()
bar
context_switch(appbar.sp, appfoo.sp)
guard.leave()
kout << "foo" << endl
guard.enter()
scheduler.resume()
foo
context_switch(appfoo.sp, appbar.sp)
guard.leave()
kout << "bar" << endl
bar


main
enter
foo
enter
bar
enter
foo
enter
bar
E_0 (Anwendung)
schedule()
leave
resume()
leave
resume()
leave
resume()
leave
$E_{\frac{1}{2}}$ (Epilog)
E_1 (IRQ/Prolog)

Fragen?

Bild: twemoji