G Nebenläufigkeit

G.1 Überblick

- Definition von Nebenläufigkeit:
  zwei Programmausführungen sind nebenläufig, wenn für zwei einzelne Befehle a und b aus beiden Ausführungen nicht feststeht, ob a oder b tatsächlich zuerst ausgeführt wird

- Nebenläufigkeit tritt auf
  - ➤ bei Interrupts
  - ➤ bei parallelen Abläufen (gleichzeitige Ausführung von Code in einem Mehrprozessorsystem mit Zugriff auf den gleichen Speicher)
  - ➤ bei quasi-parallelen Abläufen (wenn ein Betriebssystem verschiedenen Prozesse den Prozessor jeweils für einen Zeitraum zuteilt und ihn nach Ablauf der Zeit wieder entzieht)

- Problem:
  - ➤ was passiert, wenn die nebenläufigen Ausführungen auf die gleichen Daten im Speicher zugreifen?

G.2 Nebenläufigkeit durch Interrupts

- Interrupts unterbrechen Anwendungsprogramme "irgendwo"
- Interrupts haben Zugriff auf den gleichen Speicher
- Szenario:
  - ➤ eine Lichtschranke soll Fahrzeuge zählen und alle 10 Sekunden soll der Wert ausgegeben werden

```
static int a;

void main(void) {
  long i;
  while(1) {
    for (i=0; i<2000000; i++)
    /* Zählen dauert 10 Sek. */;
    print(a);
    a=0;
  }
}
```

```
/* Lichtschranken-
   Interrupt */
void count(void) {
        a++;
}
```

G.2 Nebenläufigkeit durch Interrupts (2)

- Auf C-Ebene führt die Interrupt-Behandlung nur einen Befehl aus: a++
  - ➤ nur scheinbar ein Befehl
  - ➤ auf Maschinencode-Ebene (Bsp. AVR) sieht die Sache anders aus

```
...
    print(a);
    a=0;
...
```

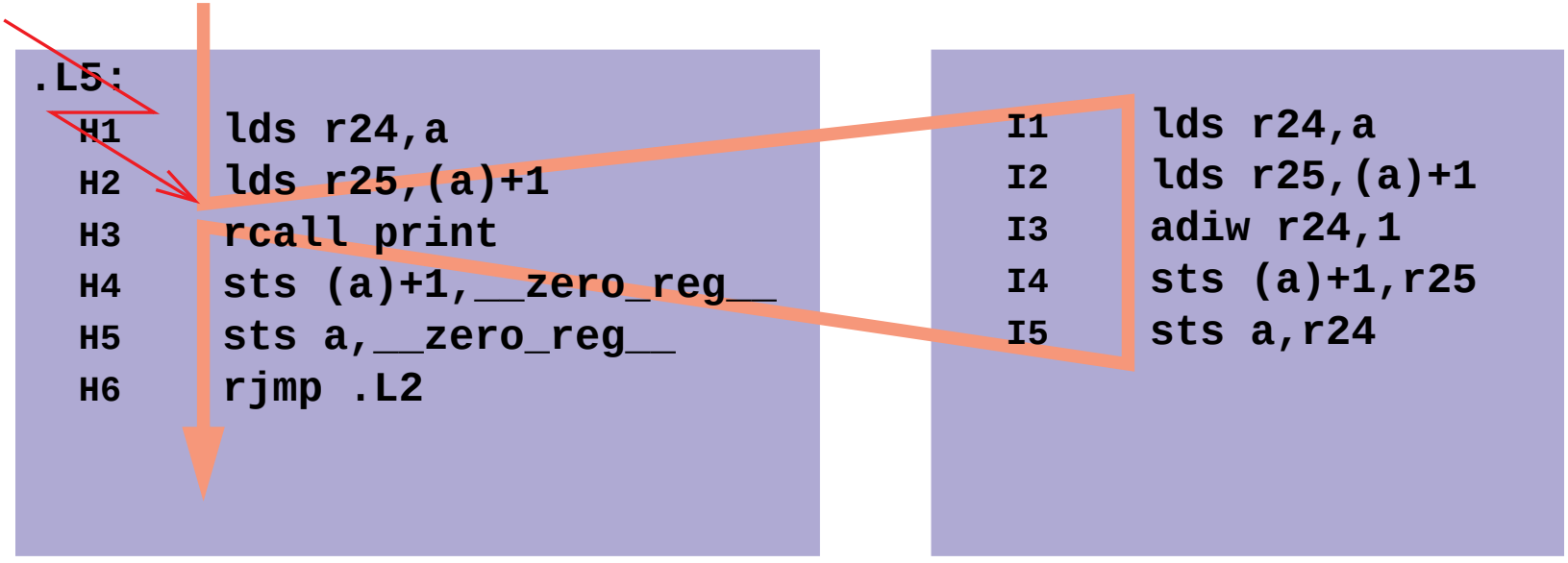
```
void count(void) {
        a++;
}
```

```
...
.L5:
        lds r24,a
        lds r25,(a)+1
        rcall print
        sts (a)+1,__zero_reg__
        sts a,__zero_reg__
        rjmp .L2
...
```

```
...
        lds r24,a
        lds r25,(a)+1
        adiw r24,1
        sts (a)+1,r25
        sts a,r24
...
```

G.2 Nebenläufigkeit durch Interrupts (3)

- Annahme1: Interrupt trifft folgendermaßen ein:



  - ➤ Folge: ein Fahrzeug wird nicht gezählt

- Details des Szenarios zeigen mehrere Problemstellen:
  - ➤ int-Wert wird in zwei Schritten in zwei Register geladen (long: 4 Register)
  - ➤ Operationen erfolgen in Registern, danach wird in Speicher zurückgeschrieben

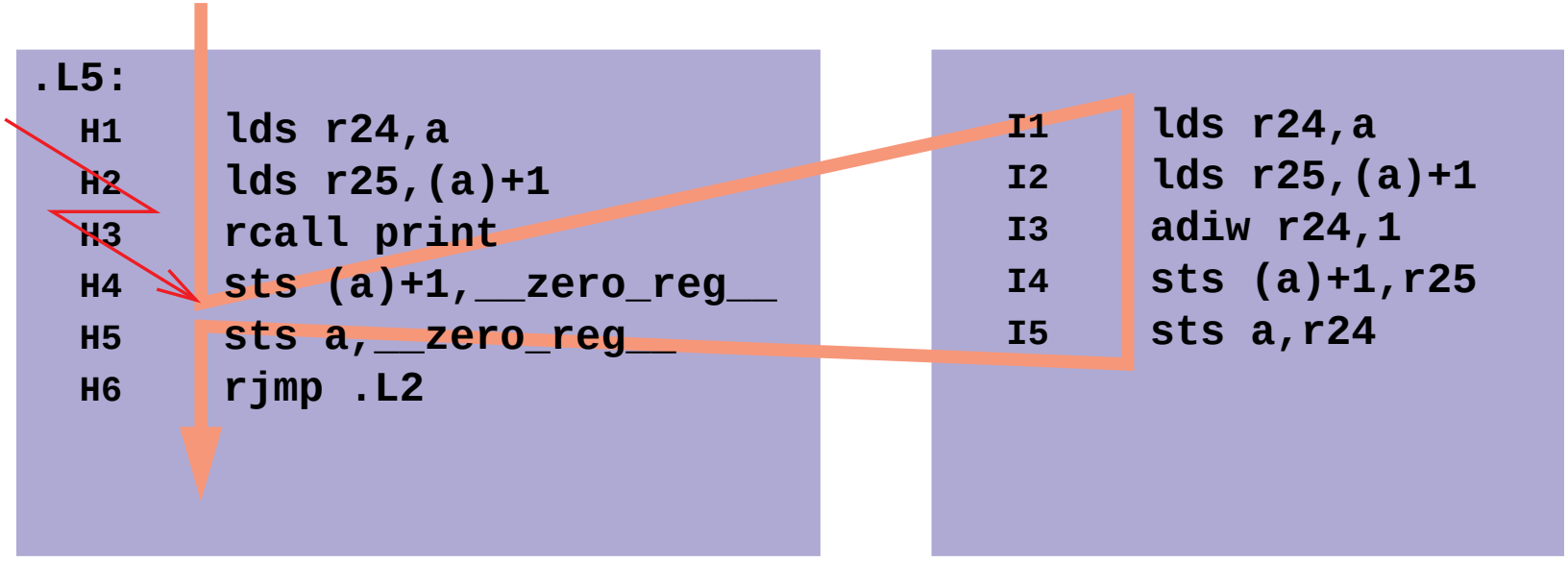
G.2 Nebenläufigkeit durch Interrupts (3)

- Skizze zu Annahme 1, a habe initial den Wert 5

Code-zeile	Variable **a**		Prozessor-Register		gesicherte Registerinhalte		Ausgabe von print
	oberes Byte	unteres Byte	**r25**	**r24**	**r25**	**r24**	
initial	**00**	**05**					
H1		05		**05**			
H2	00		**00**				
INT			00	05	**00**	**05**	
I1				**05**			
I2			**00**	05			
I3			**00**	**06**			
I4	**00**		00				
I5		**06**		06			
ret			**00**	**05**	00	05	
H3			00	05			**5**
H4	**00**						
H5		**00**					

G.2 Nebenläufigkeit durch Interrupts (4)

- Annahme 2: Interrupt trifft folgendermaßen ein:



➤ Folge: möglicherweise werden 255 Fahrzeuge zuviel gezählt

- Variable a ist auf 2 Register verteilt →a = 0 nicht atomar
  zuerst wird obere Hälfte auf 0 gesetzt
- falls a++ im Interrupt-Handler a zufällig von 255 auf 256 zählt
  → Bitüberlauf vom "unteren" in's "obere" Register
- nach Interrupt wird nur noch untere Hälfte auf 0 gesetzt → a = 256

G.2 Nebenläufigkeit durch Interrupts (4)

- Skizze zu Annahme 2, a habe initial den Wert 255

Code-zeile	Variable **a**		Prozessor-Register		gesicherte Registerinhalte		Ausgabe von print
	oberes Byte	unteres Byte	**r25**	**r24**	**r25**	**r24**	
initial	**00**	**ff**					
H1		ff		**ff**			
H2	00		**00**				
H3			00	ff			**255**
H4	**00**						
INT			00	ff	**00**	**ff**	
I1		ff		**ff**			
I2	00		**00**	ff			
I3			**01**	**00**			
I4	**01**		01				
I5		**00**		00			
ret			**00**	**ff**	00	ff	
H5	01	**00**					

G.2 Nebenläufigkeit durch Interrupts (5)

- weiteres Problem bei Zugriff auf globale Variablen:
  - AVR stellt 32 Register zur Vefügung
  - Compiler optimiert Code und vermeidet Speicherzugriffe wenn möglich
    - ➤ Variablen werden möglichst in Registern gehalten
  - Registerinhalte werden bei Interrupt gesichert und am Ende restauriert
    - ➤ Änderungen der Interrupt-Funktion an einer Variablen gehen beim Restaurieren der Register wieder verloren

- Lösung für dieses Problem:
  - Compiler muss Variablen vor jedem Zugriff aus dem Speicher laden und anschließend zurückschreiben
    - ➤ Attribut `volatile`

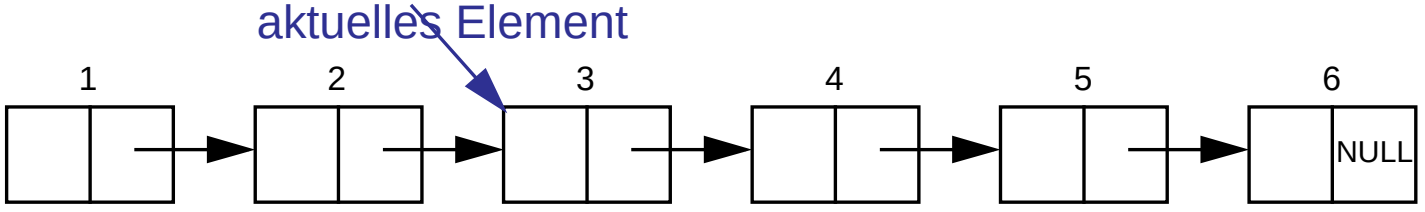
```
volatile int a;
```

  - Nachteil: Code wird umfangreicher und langsamer
    - ➤ nur einsetzen wo unbedingt notwendig!

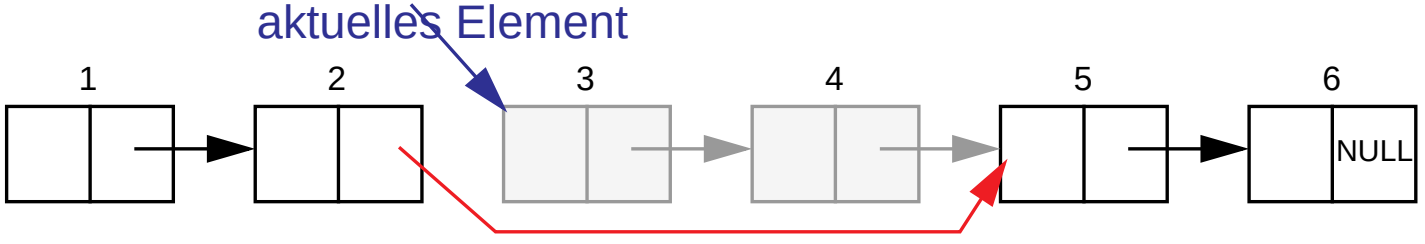
G.3 Nebenläufigkeitsprobleme allgemein

- Zugriff auf gemeinsame Daten ist bei nebenläufigen Ausführungen generell kritisch
  - ➤ selbst bei einfachen Variablen (siehe vorheriges Beispiel)
  - ➤ Problem bei komplexeren Datenstrukturen
    (z. B. Einketten einer Struktur in verkettete Liste)
    noch gravierender: Datenstruktur kann völlig zerstört werden

- Beispiel: Programm läuft durch eine verkettete Liste



  - ◆ Interrupt-Handler oder parallel laufendes Programm entfernt Elemente 3 und 4 und gibt den Speicher dieser Elemente frei



G.4 Umgang mit Nebenläufigkeitsproblemen

- Gemeinsame Daten möglichst vermeiden
  - ➤ Interrupt-Funktionen sollten weitgehend auf eigenen Daten arbeiten
  - ➤ Parallele Abläufe sollten ebenfalls möglichst eigene Datenbereiche haben
- Kommunikation zwischen Anwendungsabläufen erfordert aber oft gemeinsame Daten
  - ➤ solche Daten sollten deutlich hervorgehoben werden
    z. B. durch entsprechenden Namen

```
volatile int INT_zaehler;
```

    - betrifft nur globale Variablen
    - lokale Variablen sind unkritisch
      (nur in der jeweiligen Funktion sichtbar)
  - ➤ Zugriff auf solche Daten sollte in der Anwendung möglichst begrenzt sein
    (z. B. nur in bestimmten Funktionen,
    gemeinsames Modul mit Interrupt-Handlern, vgl. Kap. D.9-3)

G.4 Umgang mit Nebenläufigkeitsproblemen (2)

- Zugriffskonflikte mit Interrupt-Handlern verhindern
  - das Programm muss vor kritischen Zugriffen auf gemeinsame Daten Interrupts sperren
    - ➤ Beispiel AVR:
      Funktionen **`cli()`** (blockiert alle Interrupts)
      und **`sei()`** (erlaubt Interrupts)
  - Problem: Interrupt-Verluste bei Interrupt-Sperren
    - ➤ trifft ein Interrupt während der Sperre ein, wird im zugehörigen Register das entsprechende Bit gesetzt
    - ➤ treffen weitere Interrupts ein, geht diese Information verloren

  ➥ Zeitraum von Interruptsperren muss möglichst kurz bleiben!
    - ➤ es kann sinnvoll sein, nur Interrupts des Geräts zu sperren, dessen Handler auch auf die kritischen Daten zugreift
      (hängt von Details der Hardware ab!)

G.4 Umgang mit Nebenläufigkeitsproblemen (3)

- Warten auf einen Interrupt
  - Häufiges Szenario: im Programm soll auf ein bestimmtes Ereignis gewartet werden, das durch einen Interrupt signalisiert wird
    - ➤ Warten erfolgt meist passiv (Sleep-Modus des Prozessors)
  - Problem: Abfrage ob Ereignis bereits eingetreten ist, ist ein kritischer Zugriff auf gemeinsame Daten mit der Interrupt-Behandlung

```
volatile static uint8_t event = 0;
ISR(INT2_vect) { event = 1; }

void main(void) {
        sleep_enable();

        while(1) {
                while(event == 0) { /* Warte auf Ereignis */
                        sleep_cpu();
                }
                /* bearbeite Ereignis */
                ...
```

  - Synchronisation erforderlich?

G.4 Umgang mit Nebenläufigkeitsproblemen (4)

- ... Warten auf einen Interrupt
  - Was passiert, wenn der Interrupt an dieser Stelle eintrifft?

```
volatile static uint8_t event = 0;
ISR(INT2_vect) { event = 1; }

void main(void) {
        sleep_enable();

        while(1) {

                while(event == 0) { /* Warte auf Ereignis */
                        sleep_cpu();
                }

                /* bearbeite Ereignis */
                ...
```

Interrupt!

  - ➥ Lost-wakeup-Problem

G.4 Umgang mit Nebenläufigkeitsproblemen (5)

- ... Warten auf einen Interrupt
  - kritischer Abschnitt

```
volatile static uint8_t event = 0;
ISR(INT2_vect) { event = 1; }

void main(void) {
        sleep_enable();

        while(1) {
                kritischer Abschnitt
                while(event == 0) { /* Warte auf Ereignis */
                        sleep_cpu();
                                        Interrupt!
                }

                /* bearbeite Ereignis */
                ...
```

  - können hier Interruptsperren helfen?

G.4 Umgang mit Nebenläufigkeitsproblemen (6)

- ... Warten auf einen Interrupt
  - Problem: Interruptsperre muss vor dem `sleep_cpu()` aufgehoben werden

```
volatile static uint8_t event = 0;
ISR(INT2_vect) { event = 1; }

void main(void) {
        sleep_enable();

        while(1) {
                cli();
                while(event == 0) { /* Warte auf Ereignis */
                        sei();
                        sleep_cpu();

                }

                /* bearbeite Ereignis */
                ...
```

kritischer Abschnitt

Interrupt!

  - ➤ aber Interrupt darf nicht zwischen `sei()` und `sleep_cpu()` kommen
  - ➤ Lösung: `sei()` und die Folgeanweisung werden atomar ausgeführt

G.4 Umgang mit Nebenläufigkeitsproblemen (7)

- Einseitige Synchronisation
  - Besonderheit bei Nebenläufigkeit durch Interrupts:
    - ➤ der Interrupt kann den normalen Programmablauf unterbrechen
    - ➤ aber nicht umgekehrt
    - ➥ die Interruptbehandlung wird nie unterbrochen (höchstens durch Interrupts mit höherer Priorität)
- Mehrseitige Synchronisation
  - Standardsituation bei parallelen Abläufen (z. B. auf Mehrkern-Prozessor)
    - ➤ Interruptsperren helfen hier nicht
  - Lösungen
    - ➤ spezielle atomare Maschinenbefehle (z. B. test-and-set oder compare-and-swap bei Intel-Architekturen)
    - ➤ Software-Synchronisation (lock-Variablen, Semaphore, etc.)
    - ➤ Kommunikation mittels Nachrichten statt gemeinsamer Daten

H Programme, Prozesse und Speicher

- **Programm:** Folge von Anweisungen
  (hinterlegt beispielsweise als ausführbare Datei auf dem Hintergrundspeicher)

- **Prozess:** Betriebssystemkonzept
  - ➤ Programm, das sich in Ausführung befindet, und seine Daten
    (Beachte: ein Programm kann sich mehrfach in Ausführung befinden)
  - ➤ eine konkrete Ausführungsumgebung für ein Programm
    Speicher, Rechte, Verwaltungsinformation (verbrauchte Rechenzeit,...),...

- jeder Prozess bekommt einen eigenen virtuellen Adressraum zur Verfügung gestellt
  - ➤ eigener (virtueller) Speicherbereich von 0 bis 2 GB (oder mehr bis 4 GB)
  - ➤ Datenbereichevon verschiedenen Prozessen und Betriebssystem sind gegeneinander geschützt
  - ➤ Datentransfer zwischen Prozessen nur durch Vermittlung des Betriebssystems möglich

H.1 Speicherorganisation eines Prozesses

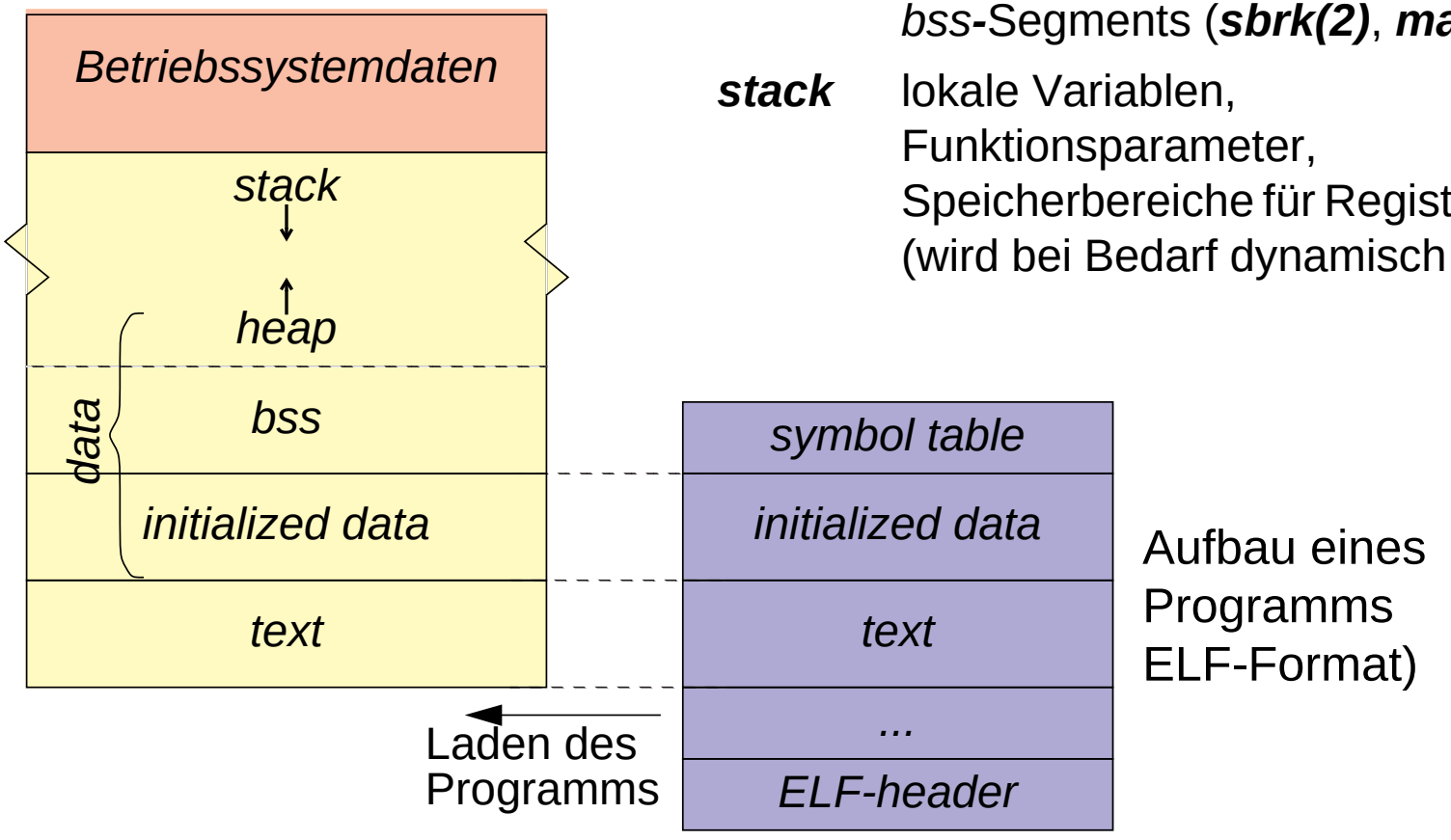
text Programmkode

data globale und static Variablen

bss nicht initialisierte globale und *static* Variablen (wird vor der Vergabe an den Prozess mit 0 vorbelegt)

heap dynamische Erweiterungen des *bss*-Segments (***sbrk(2)***, ***malloc(3)***)

stack lokale Variablen, Funktionsparameter, Speicherbereiche für Registerinhalte, (wird bei Bedarf dynamisch erweitert)

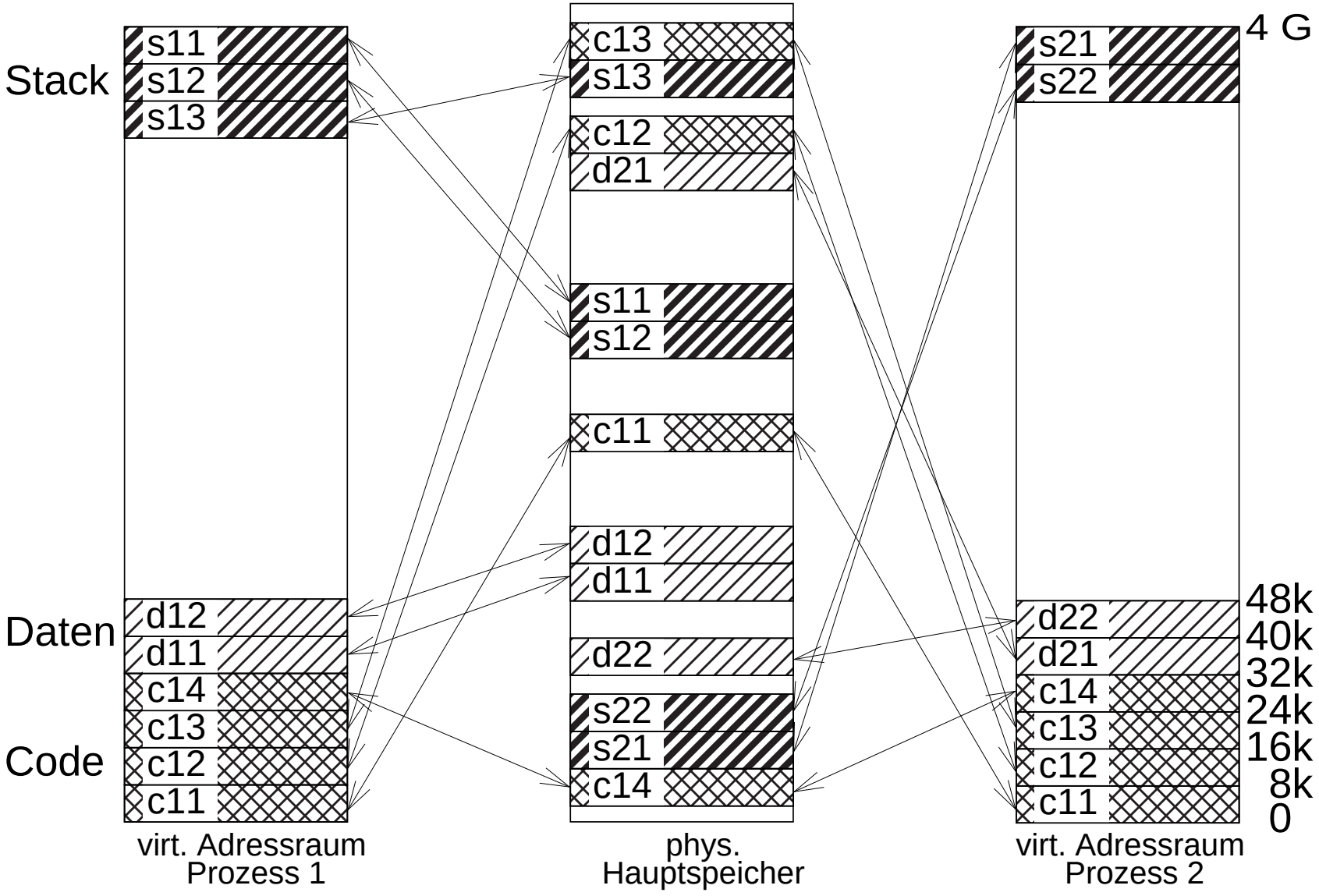


Aufbau eines Programms (ELF-Format)

H.1 Speicherorganisation eines Prozesses (2)

- Abbildung des virtuellen Adressraums in den realen Hauptspeicher durch Seitenadressierung (**Paging)**
  - ➤ Adreßraum ist in kleine (4 oder 8 kB) Stücke unterteilt (**Seiten**)
  - ➤ jede Seite wird über eine Tabelle in ein entsprechendes Stück des Hauptspeichers (**Kachel**) abgebildet
  - ➤ bei jedem Speicherzugriff wird die virtuelle Adresse in die entsprechende physikalische Adresse umgerechnet
    (spezielle Hardware: Memory Management Unit - MMU)
  - ➤ zu jeder Seite sind Zugriffsrechte vermerkt (nur lesen, lesen+schreiben, Maschinenbefehle ausführen)
  - ➤ eine Seite kann bei Speichermangel von Betriebssystem auf Festplatte ausgelagert werden und bei Bedarf automatisch wieder eingelagert werden

H.1 Speicherorganisation eines Prozesses(3)



H.2 Stackaufbau eines Prozesses

1 Prinzip

- für jede Funktion wird ein ***Stack-Frame*** angelegt, in dem
  - lokale Variablen der Funktion
  - Aufrufparameter an weitere Funktionen
  - Registerbelegung der Funktion während des Aufrufs weiterer Funktionen

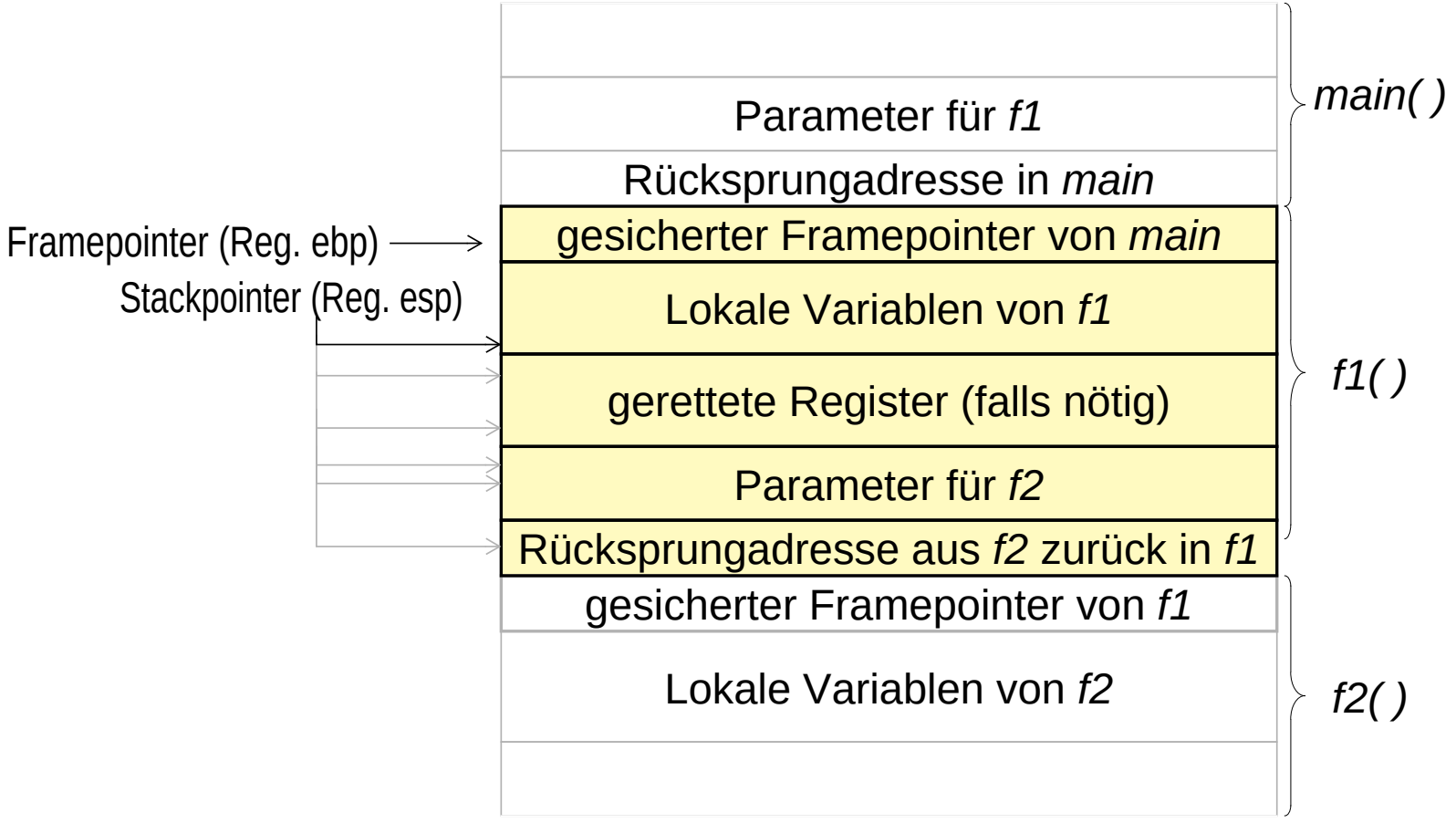
  gespeichert werden

- Stackorganisation ist abhängig von
  - Prozessor
  - Compiler und
  - Betriebssystem

- Beispiele aus einem UNIX auf Intel-Prozessor (typisch für CISC)
  - RISC-Prozessoren mit Registerfiles gehen teilweise anders vor!

2 Beispiel

- Aufbau eines **Stack-Frames** (Funktionen *main( ), f1( ), f2( )*)

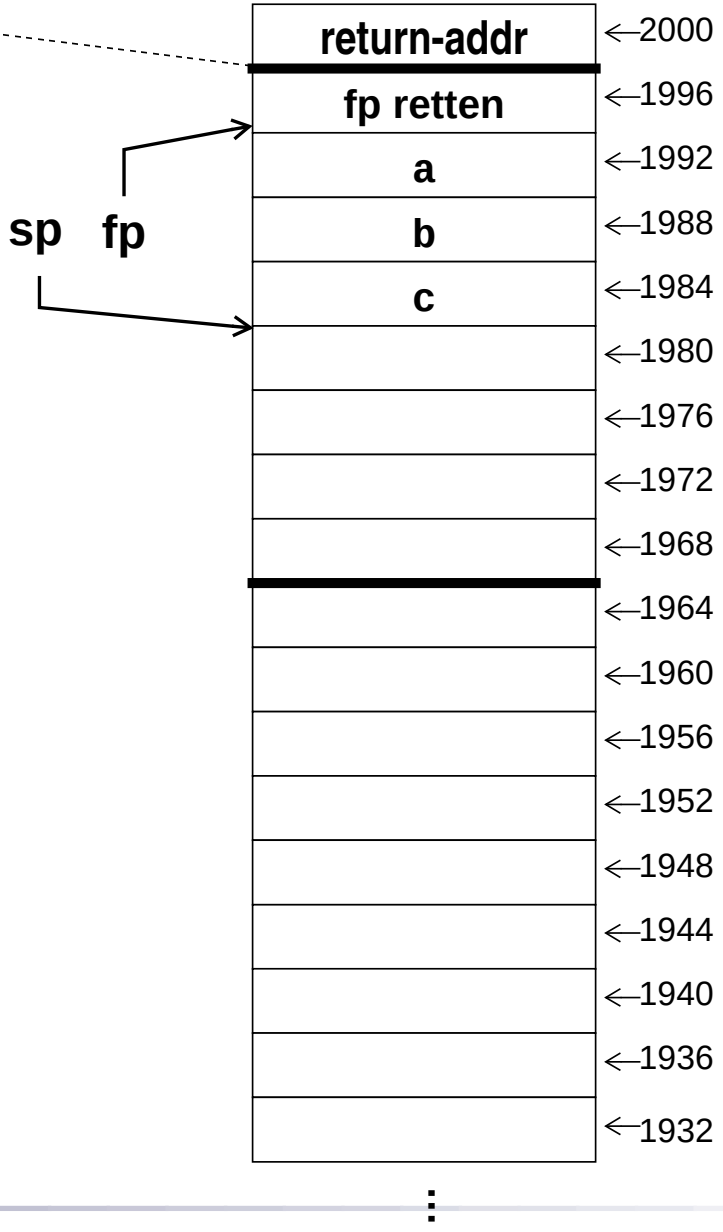


➤ Achtung: architekturabängige Optimierungen können zu Padding (Füllbytes) führen!

2 Stack mehrerer Funktionsaufrufe

```
int main() {
        int a, b, c;

        a = 10;
        b = 20;

        f1(a, b);

        return(a);
}
```

Stack-Frame für main erstellen
&a = fp-4
&b = fp-8
&c = fp-12

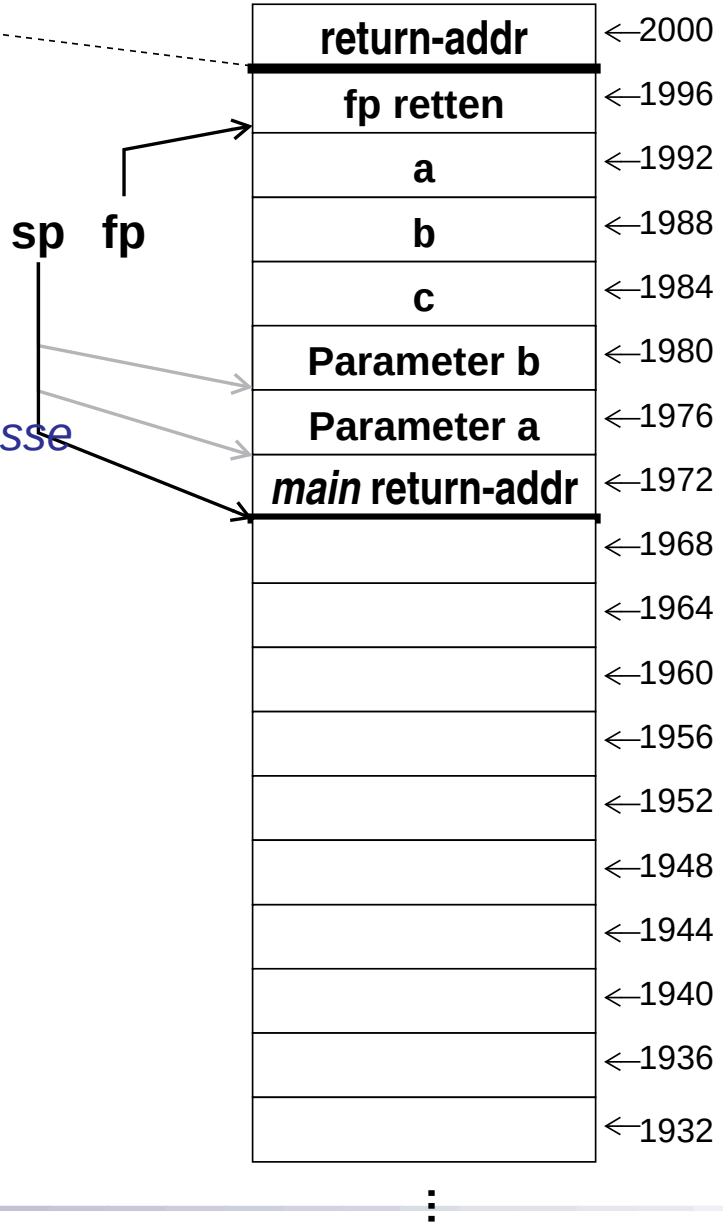


2 Stack mehrerer Funktionsaufrufe

```
int main() {
        int a, b, c;

        a = 10;
        b = 20;

        f1(a, b);

        return(a);
}
```

Parameter auf Stack legen

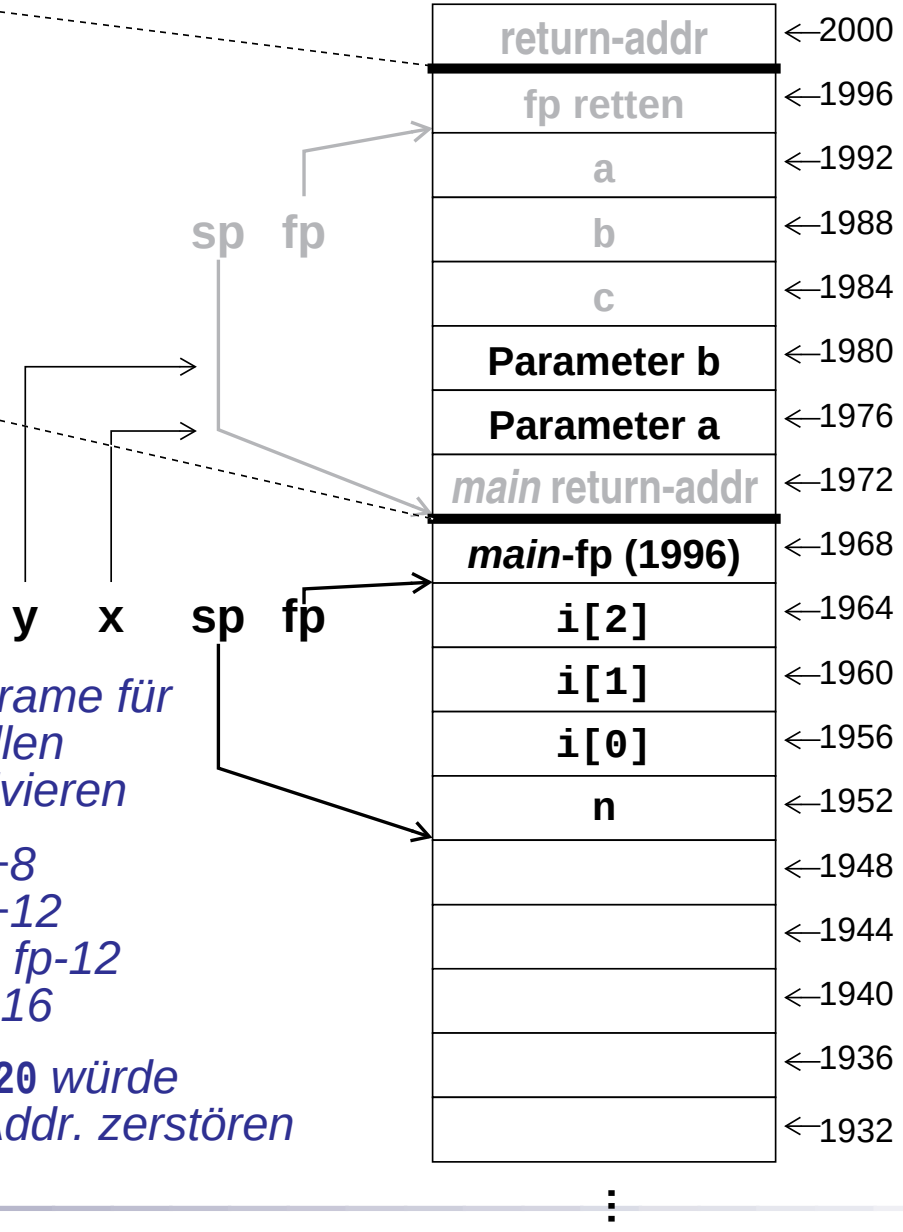
Bei Aufruf Rücksprungadresse auf Stack legen



2 Stack mehrerer Funktionsaufrufe

```
int main() {
        int a, b, c;

        a = 10;
        b = 20;

        f1(a, b);

        return(a);
}
```

```
int f1(int x, int y) {
        int i[3];
        int n;

        x++;

        n = f2(x);

        return(n);
}
```



Stack-Frame für f1 erstellen und aktivieren

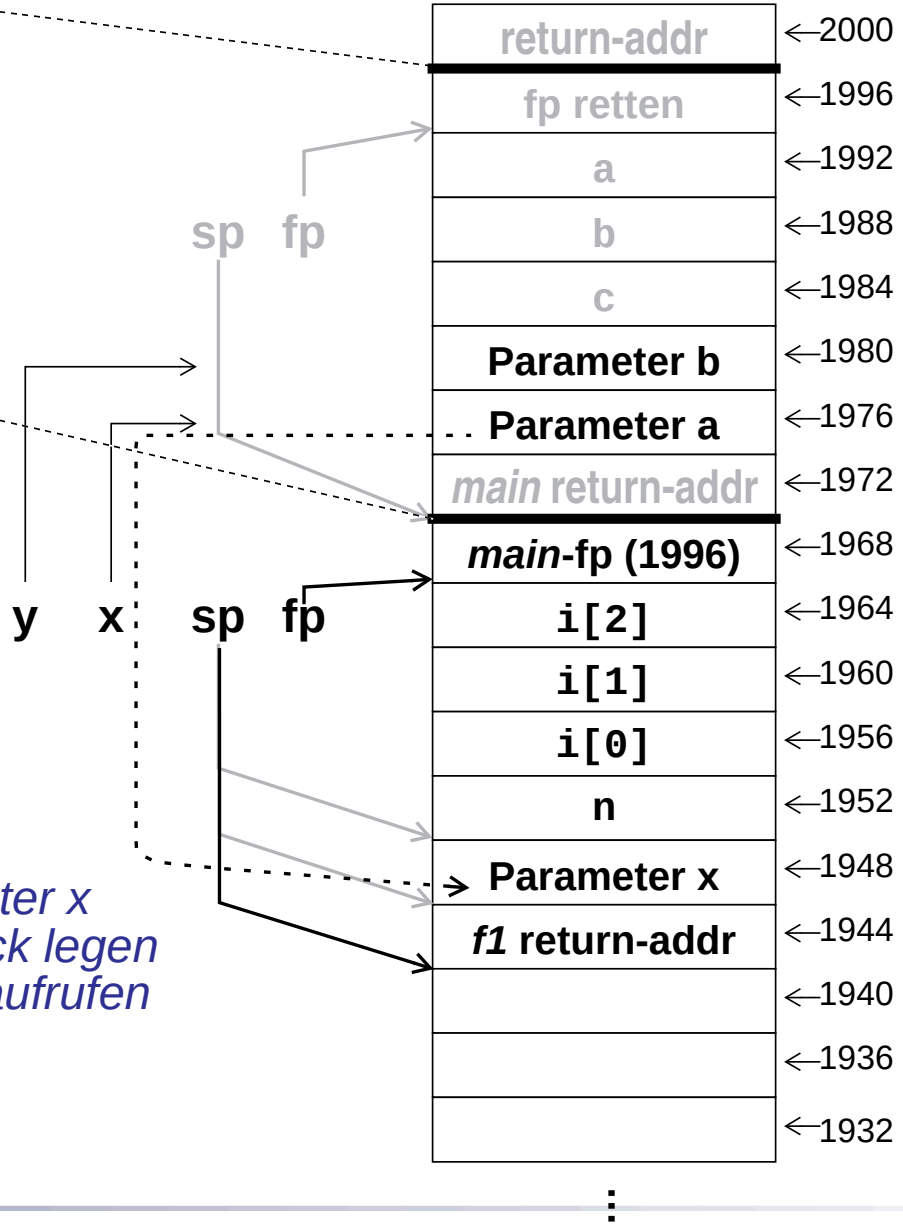
&x = fp+8
&y = fp+12
&(i[0]) = fp-12
&n = fp-16

`i[4] = 20` *würde return-Addr. zerstören*

2 Stack mehrerer Funktionsaufrufe

```
int main() {
        int a, b, c;

        a = 10;
        b = 20;

        f1(a, b);

        return(a);
}
```

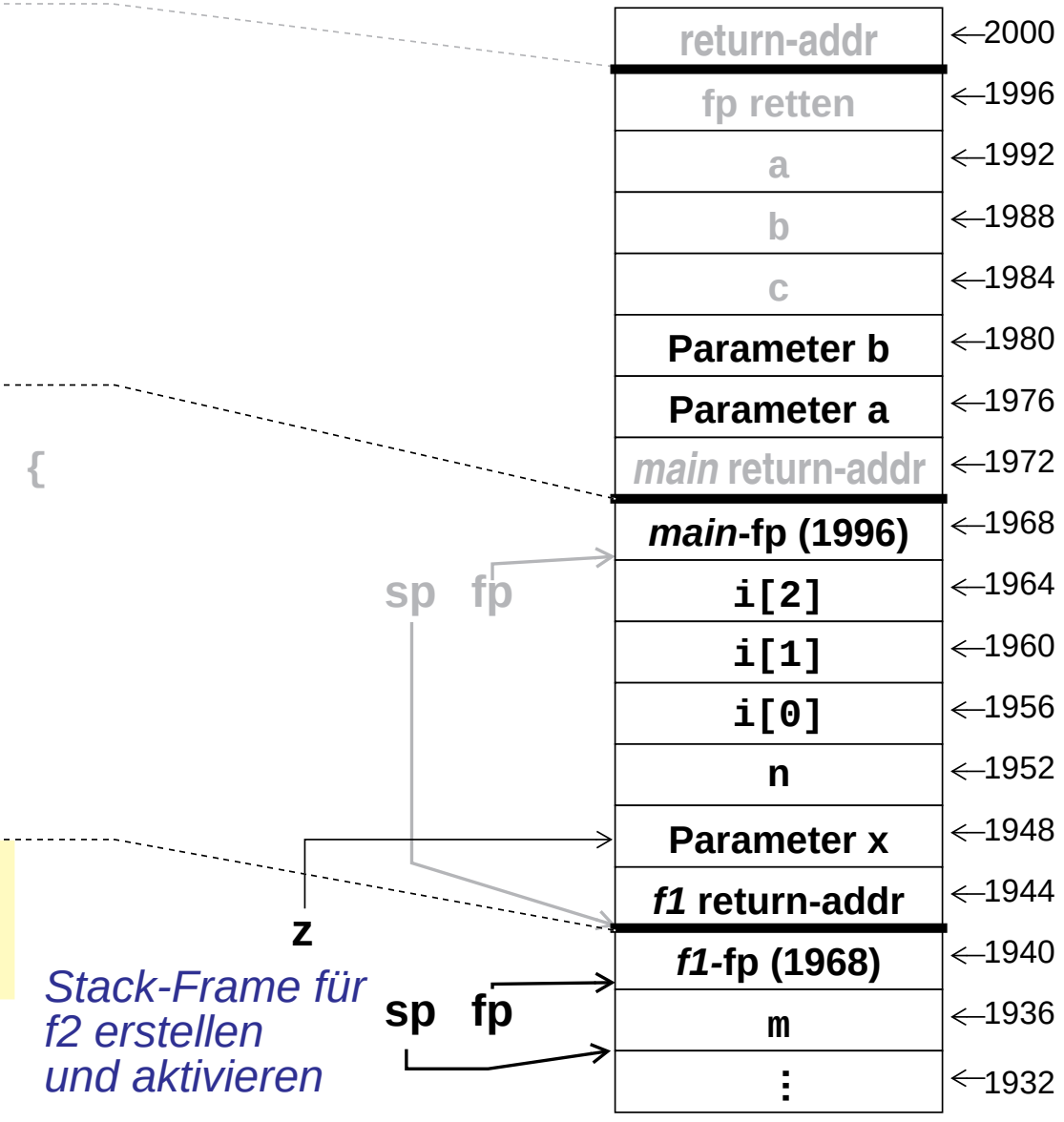
```
int f1(int x, int y) {
        int i[3];
        int n;

        x++;

        n = f2(x);

        return(n);
}
```



Parameter x auf Stack legen und f2 aufrufen

2 Stack mehrerer Funktionsaufrufe

```
int main() {
        int a, b, c;

        a = 10;
        b = 20;

        f1(a, b);

        return(a);
}


int f1(int x, int y) {
        int i[3];
        int n;

        x++;

        n = f2(x);

        return(n);
}

int f2(int z) {
        int m;

        m = 100;

        return(z+1);
}
```

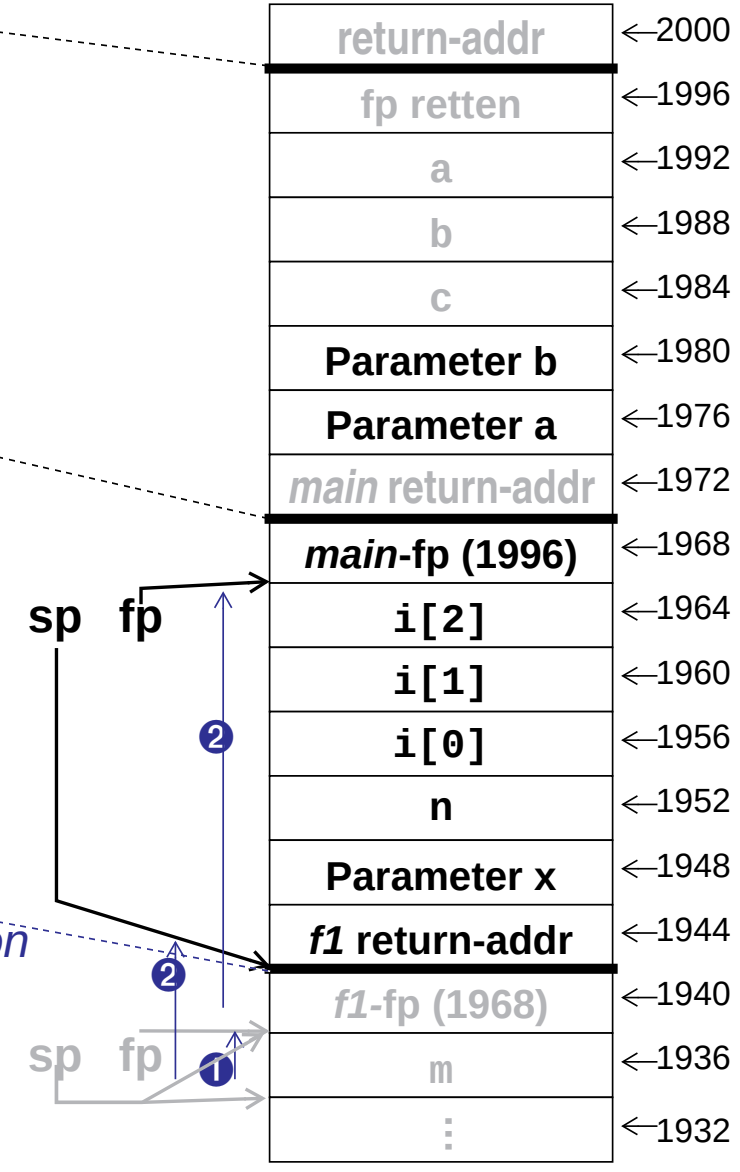


2 Stack mehrerer Funktionsaufrufe

```
int main() {
        int a, b, c;

        a = 10;
        b = 20;

        f1(a, b);

        return(a);
}


int f1(int x, int y) {
        int i[3];
        int n;

        x++;

        n = f2(x);

        return(n);
}

int f2(int z) {
        int m;

        m = 100;

        return(z+1);
}
```

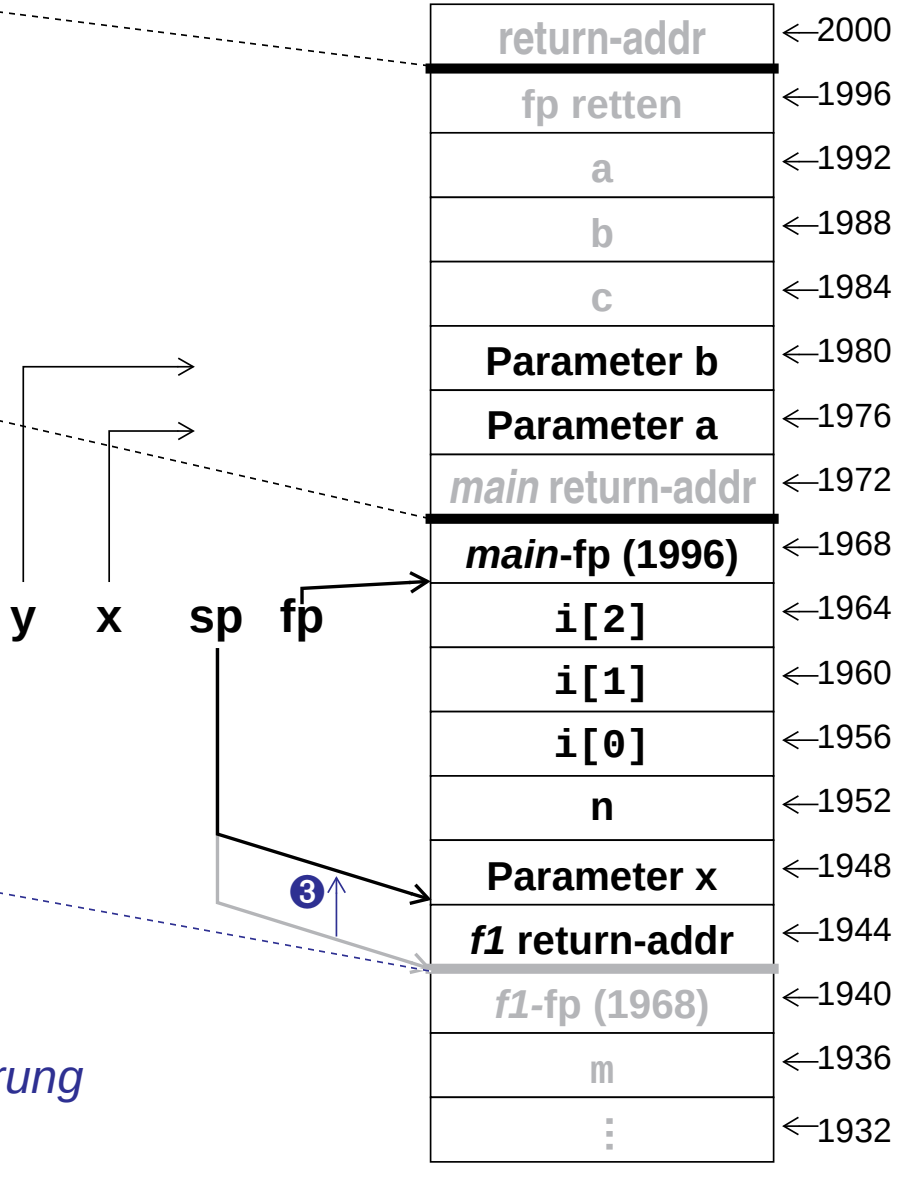
Stack-Frame von f2 abräumen

❶ *sp = fp*
❷ *fp = pop(sp)*



2 Stack mehrerer Funktionsaufrufe

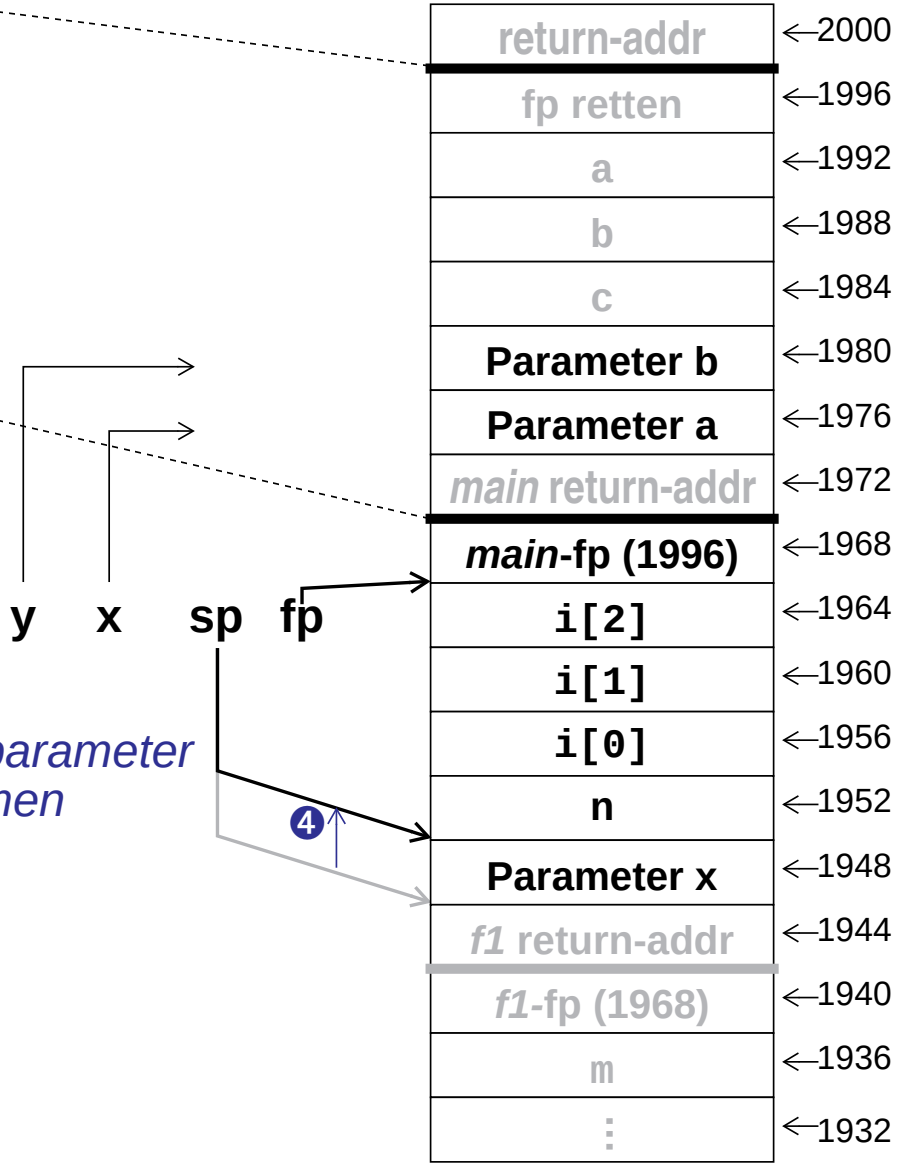
```
int main() {
        int a, b, c;

        a = 10;
        b = 20;

        f1(a, b);

        return(a);
}


int f1(int x, int y) {
        int i[3];
        int n;

        x++;

        n = f2(x);

        return(n);
}

int f2(int z) {
        int m;

        m = 100;

        return(z+1);
}
```



2 Stack mehrerer Funktionsaufrufe

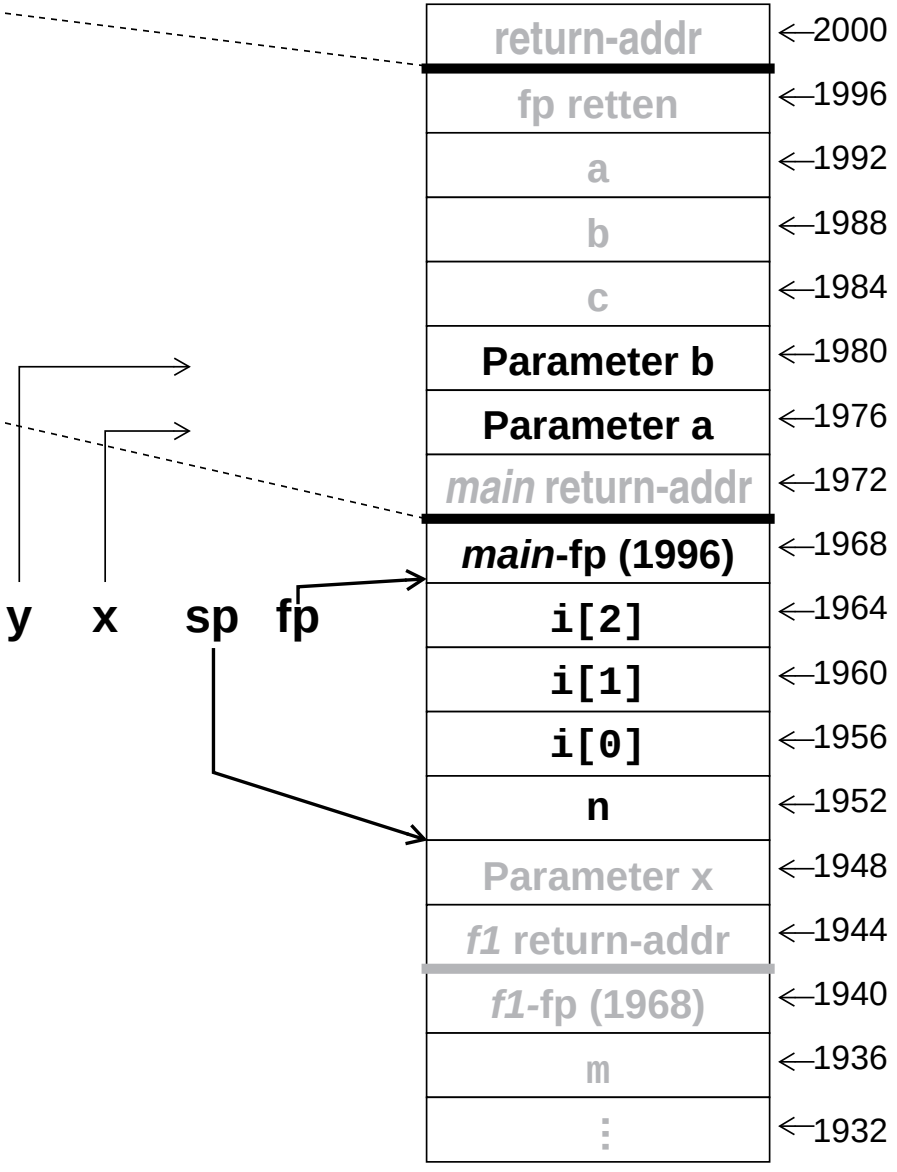
```
int main() {
        int a, b, c;

        a = 10;
        b = 20;

        f1(a, b);

        return(a);
}


int f1(int x, int y) {
        int i[3];
        int n;

        x++;

        n = f2(x);

        return(n);
}
```

❹ *Aufrufparameter abräumen*



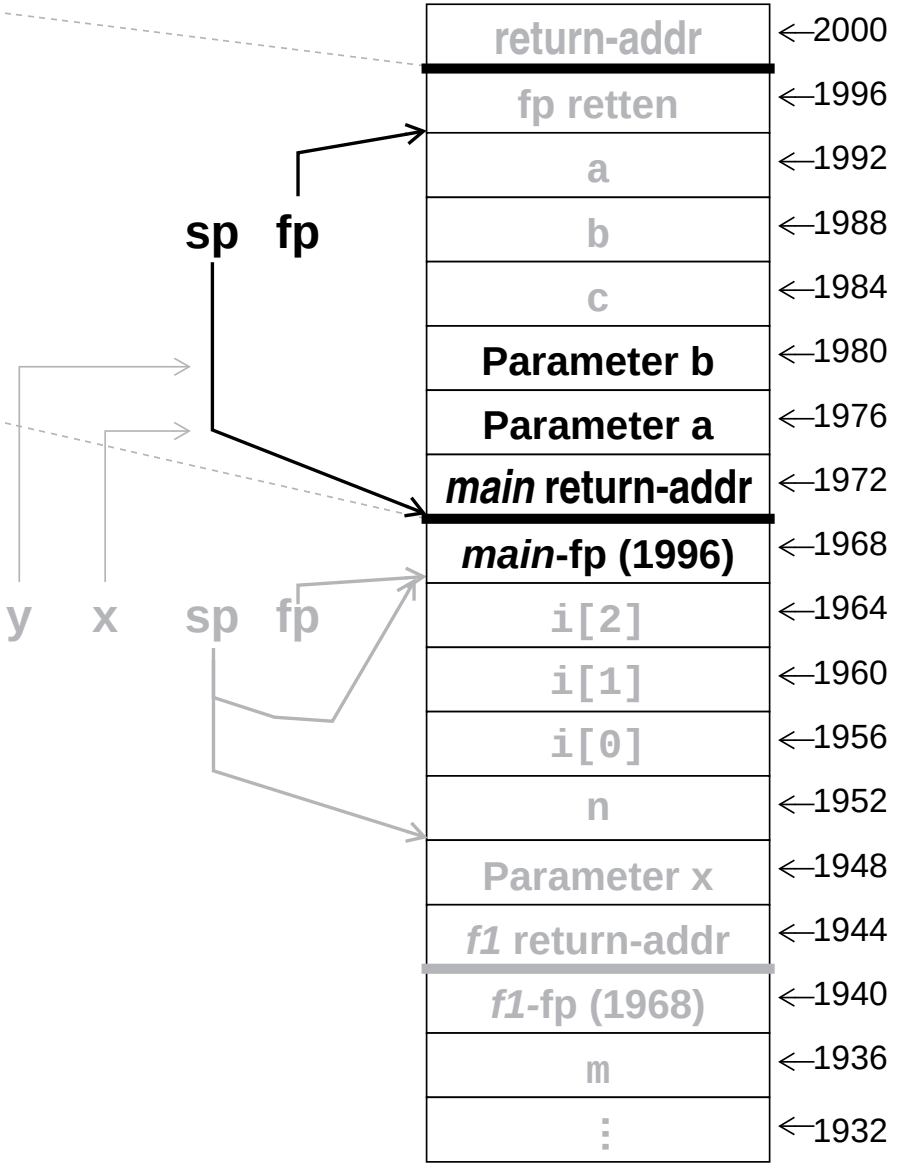
2 Stack mehrerer Funktionsaufrufe

```
int main() {
        int a, b, c;

        a = 10;
        b = 20;

        f1(a, b);

        return(a);
}


int f1(int x, int y) {
        int i[3];
        int n;

        x++;

        n = f2(x);

        return(n);
}
```



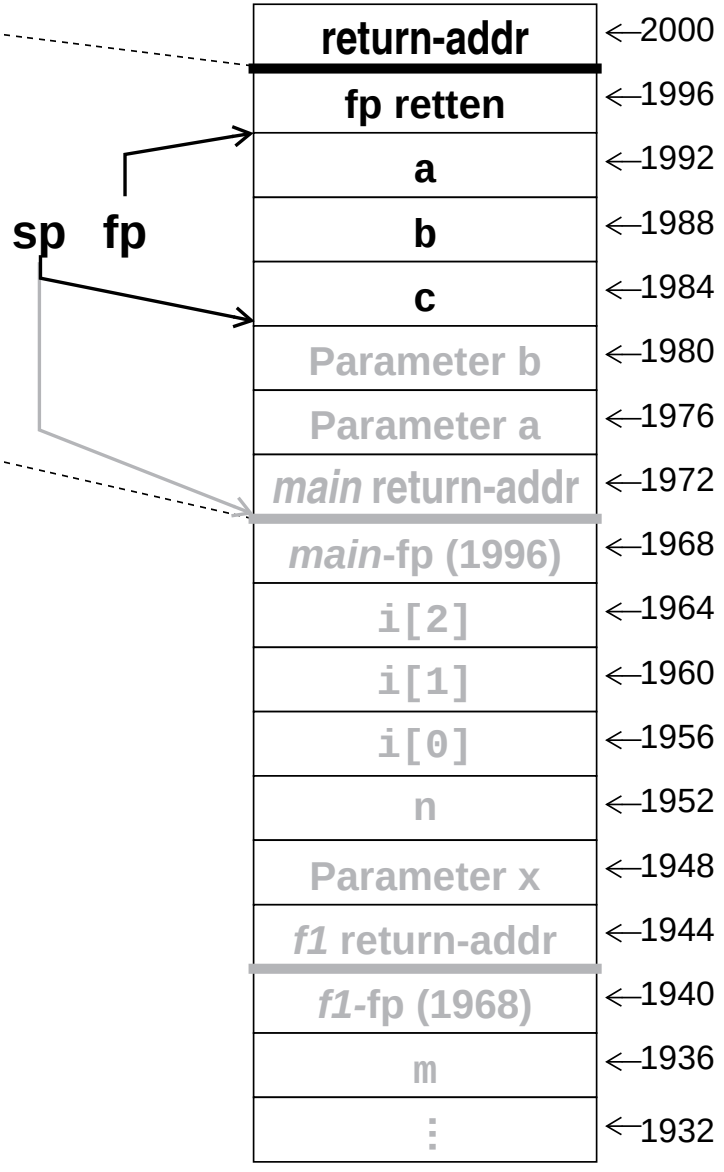
2 Stack mehrerer Funktionsaufrufe

```
int main() {
        int a, b, c;

        a = 10;
        b = 20;

        f1(a, b);

        return(a);
}


int f1(int x, int y) {
        int i[3];
        int n;

        x++;

        n = f2(x);

        return(n);
}
```



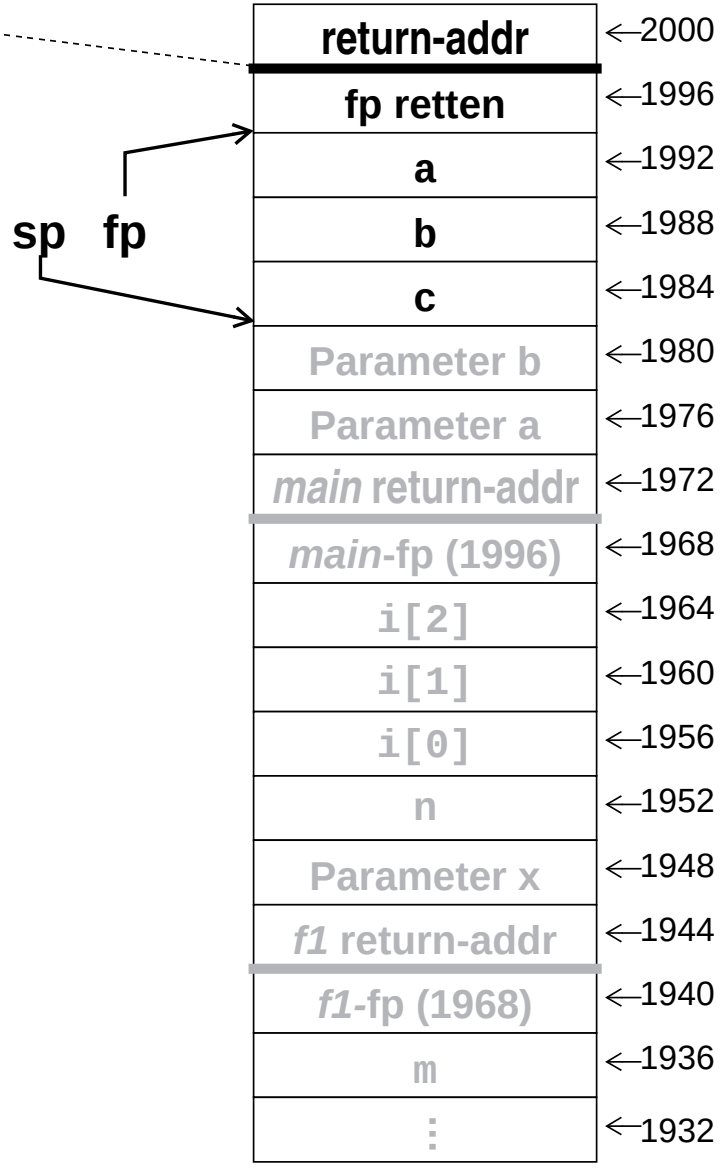
2 Stack mehrerer Funktionsaufrufe

```
int main() {
        int a, b, c;

        a = 10;
        b = 20;

        f1(a, b);

        return(a);
}


int f1(int x, int y) {
        int i[3];
        int n;

        x++;

        n = f2(x);

        return(n);
}
```



2 Stack mehrerer Funktionsaufrufe

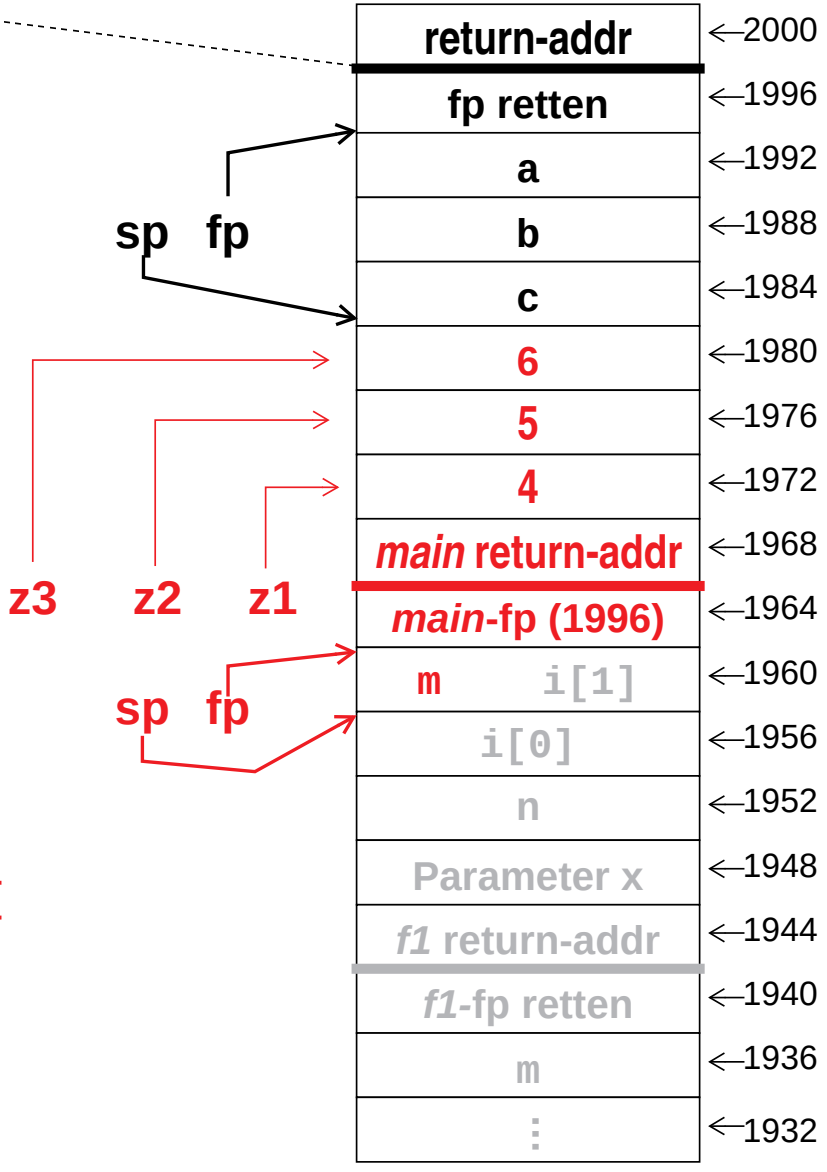
```
int main() {
        int a, b, c;

        a = 10;
        b = 20;

        f1(a, b);

        return(a);
}
```



2 Stack mehrerer Funktionsaufrufe

```
int main() {
        int a, b, c;

        a = 10;
        b = 20;

        f1(a, b);

        f3(4,5,6);
}
```

was wäre, wenn man nach f1 jetzt eine Funktion f3 aufrufen würde?




```
int f3(int z1, int z2, int z3) {
        int m;

        return(m);
}
```