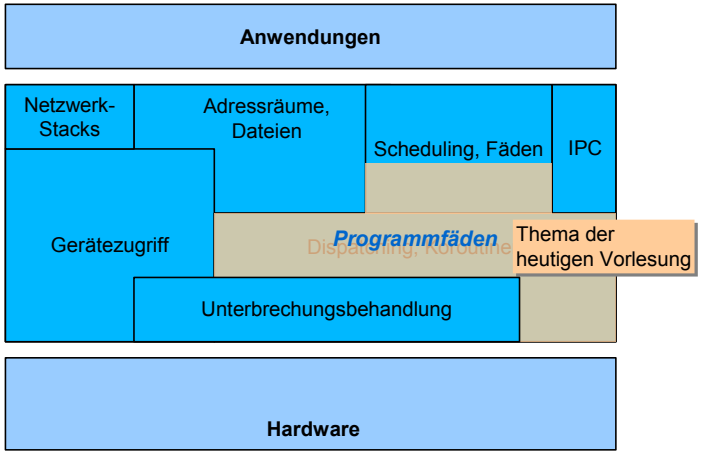
Betriebssysteme (BS)

Koroutinen und Fäden

Daniel Lohmann

Lehrstuhl für Informatik 4
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Überblick: Einordnung dieser VL



Agenda

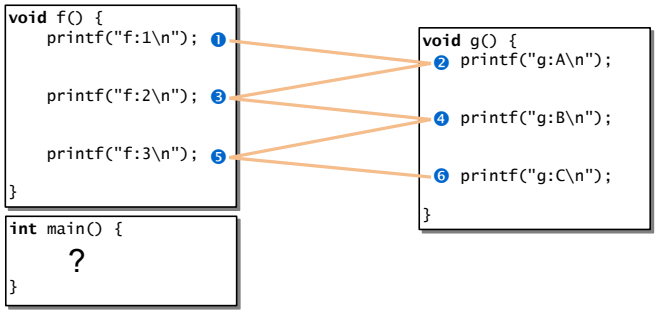
- Motivation: Quasi-Parallelität
  - Einige Versuche
- Grundbegriffe
  - Routine und Kontrollfluss
  - Koroutine, Kontrollfluss und Programmfaden
  - asymmetrisches und symmetrisches Fortsetzungsmodell
- Implementierung von Koroutinen
  - Fortsetzungen
  - Elementaroperationen
- Ausblick
  - Koroutinen als Hilfsmittel für das BS
  - Mehrfädigkeit
- Zusammenfassung

Agenda

- **Motivation: Quasi-Parallelität**
  - **Einige Versuche**
- Grundbegriffe
  - Routine und Kontrollfluss
  - Koroutine, Kontrollfluss und Programmfaden
  - asymmetrisches und symmetrisches Fortsetzungsmodell
- Implementierung von Koroutinen
  - Fortsetzungen
  - Elementaroperationen
- Ausblick
  - Koroutinen als Hilfsmittel für das BS
  - Mehrfädigkeit
- Zusammenfassung

Motivation: Quasi-Parallelität

- **Gegeben:** Funktionen **f** und **g**
- **Ziel:** **f** und **g** sollen „versetzt“ ablaufen



Motivation: Quasi-Parallelität – Versuch 1

```
void f() {
    printf("f:1\n");

    printf("f:2\n");

    printf("f:3\n");
}
```

```
int main() {
  f();
  g();
}
```

```
void g() {
    printf("g:A\n");

    printf("g:B\n");

    printf("g:C\n");
}
```

```
lohmann@faui48a>gcc routine.c -o routine
lohmann@faui48a>./routine
f:1
f:2
f:3
g:A
g:B
g:C
```

Das funktioniert so natürlich nicht...

Motivation: Quasi-Parallelität – Versuch 2

```
void f() {
    printf("f:1\n");
    g();

    printf("f:2\n");
    g();

    printf("f:3\n");
    g();
}
```

```
int main() {
  f();
}
```

```
void g() {
    printf("g:A\n");

    printf("g:B\n");

    printf("g:C\n");
}
```

```
lohmann@faui48a>gcc routine.c -o routine
lohmann@faui48a>./routine
f:1
g:A
g:B
g:C
f:2
...
```

So geht es wohl auch nicht...

Motivation: Quasi-Parallelität – Versuch 3

```
void f() {
    printf("f:1\n");
    g();

    printf("f:2\n");
    g();

    printf("f:3\n");
    g();
}
```

```
int main() {
  f();
}
```

```
void g() {
    printf("g:A\n");
    f();

    printf("g:B\n");
    f();

    printf("g:C\n");
    f();
}
```

```
lohmann@faui48a>gcc routine.c -o routine
lohmann@faui48a>./routine
f:1
g:A
f:1
g:A
...
Segmentation fault
```

So schon gar nicht!

Motivation: Quasi-Parallelität – Versuch 4

```
void f_start() {
    printf("f:1\n");
    f = &&l1; goto *g;

l1: printf("f:2\n");
    f = &&l2; goto *g;

l2: printf("f:3\n");
    goto *g;
}
```

```
void (*volatile f)();
void (*volatile g)();

int main() {
    f = f_start;
    g = g_start;
    f();
}
```

```
void g_start() {
    printf("g:A\n");
    g = &&l1; goto *f;

l1: printf("g:B\n");
    g = &&l2; goto *f;

l2: printf("g:C\n");
    exit(0);
}
```

Und so?

Motivation: Quasi-Parallelität – Versuch 4

```
void f_start() {
    printf("f:1\n");
    f = &&l1; goto *g;

l1: printf("f:2\n");
    f = &&l2; goto *g;

l2: printf("f:3\n");
    goto *g;
}
```

```
void (*volatile f)();
void (*volatile g)();

int main() {
    f = f_start;
    g = g_start;
    f();
}
```

```
void g_start() {
    printf("g:A\n");
    g = &&l1; goto *f;

l1: printf("g:B\n");
    g = &&l2; goto *f;

l2: printf("g:C\n");
    exit(0);
}
```

```
lohmann@faui48a>gcc-2.95 -fomit-frame-
pointer -o coroutine coroutine.c
lohmann@faui48a>./coroutine
f:1
g:A
f:2
g:B
f:3
g:C
```

Klappt!

Motivation: Quasi-Parallelität – Versuch 4

```
void f_start() {
    printf("f:1\n");
    f = &&l1; goto *g;

l1: printf("f:2\n");
    f = &&l2; goto *g;

l2: printf("f:3\n");
    goto *g;
}
```

```
void (*volatile f)();
void (*volatile g)();

int main() {
    f = f_start;
    g = g_start;
    f();
}
```

```
void g_start() {
    printf("g:A\n");
    g = &&l1; goto *f;

l1: printf("g:B\n");
    g = &&l2; goto *f;

l2: printf("g:C\n");
    exit(0);
}
```

```
lohmann@faui48a>gcc-2.95 -fomit-frame-
pointer -o coroutine coroutine.c
lohmann@faui48a>./coroutine
f:1
g:A
f:2
g:B
f:3
g:C
```

Bitte nicht zuhause nachmachen!

Warum?

Quasi-Parallelität: Erstes Fazit

- Quasi-Parallelität zwischen zwei Funktions-Ausführungen kann nicht erreicht werden durch Funktionsaufrufe
  - einfache Funktionsaufrufe (Versuche 1 und 2)
    - → laufen immer komplett durch
  - rekursive Funktionsaufrufe (Versuch 3)
    - → dito, deshalb Endlosrekursion und Stapelüberlauf
- Wir brauchen Funktionen, die „während der Ausführung“ verlassen und wieder betreten werden können
  - also ungefähr so wie in Versuch 4
    - PC der Ausführungen wird gespeichert, mit goto wieder aufgenommen
  - aber bitte ohne die damit einhergehenden Probleme
    - direkte Sprünge aus und in Funktionen sind in C undefiniert! (goto über Zeiger ist ein gcc-“Feature“)
    - Zustand besteht aus mehr als dem PC – Was ist mit Registern, Stapel?

Agenda

- Motivation: Quasi-Parallelität
  - Einige Versuche
- **Grundbegriffe**
  - **Routine und Kontrollfluss**
  - **Koroutine, Kontrollfluss und Programmfaden**
  - **asymmetrisches und symmetrisches Fortsetzungsmodell**
- Implementierung von Koroutinen
  - Fortsetzungen
  - Elementaroperationen
- Ausblick
  - Koroutinen als Hilfsmittel für das BS
  - Mehrfädigkeit
- Zusammenfassung

Grundbegriffe: Routine, Kontrollfluss

- **Routine**: eine endliche Sequenz von Anweisungen
  - z.B. die Funktion **f**
  - Sprachmittel fast aller Programmiersprachen
  - wird ausgeführt durch (Routinen-)Kontrollfluss
- **(Routinen-)Kontrollfuss**: eine (Routinen-)Ausführung
  - **Ausführung** und **Kontrollfluss** sind synonyme Begriffe
  - z.B. die Ausführung **<f>** der Funktion f
    - beginnt bei Aktivierung mit der ersten Anweisung von f

Zwischen Routinen und Ausführungen besteht eine Art Schema-Instanz–Relation. Zur klaren Unterscheidung werden Ausführungen deshalb hier in spitzen Klammern gesetzt:

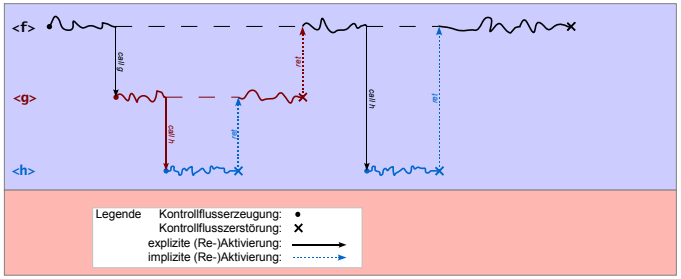
<f>, **<f'>**, **<f''>**, bezeichnen Ausführungen der Funktion **f**.

Grundbegriffe: Routine, Kontrollfluss

- Routinen-Kontrollflüsse werden erzeugt, gesteuert und zerstört mit speziellen **Elementaroperationen**
  - <f> ***call*** g (Ausführung <f> erreicht Anweisung *call* g)
    - **erzeugt** neue Ausführung <g> von g
    - **suspendiert** die Ausführung <f>
    - **aktiviert** die Ausführung <g> (erste Anweisung wird ausgeführt)
  - <g> ***ret*** (Ausführung <g> erreicht Anweisung *ret*)
    - **zerstört** die Ausführung <g>
    - **reaktiviert** die Ausführung des erzeugenden Kontrollflusses

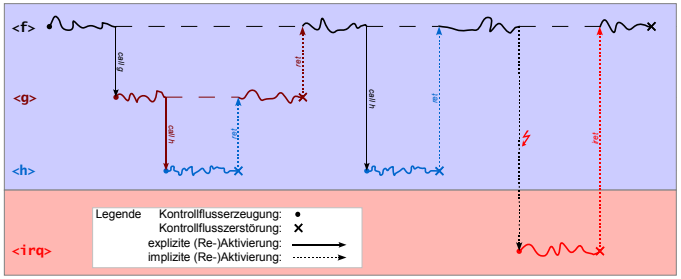
Routinen → asymmetrisches Fortsetzungsmodell

- Routinen-Kontrollflüsse bilden eine **Fortsetzungshierarchie**
  - Vater-Kind-Relation zwischen Erzeuger und Erzeugtem
- Aktivierte Kontrollflüsse werden nach **LIFO** fortgesetzt.
  - Der zuletzt aktivierte Kontrollfluss terminiert immer zuerst.
  - Vater wird erst fortgesetzt, wenn Kind terminiert



Routinen → asymmetrisches Fortsetzungsmodell

- Das gilt auch bei **Unterbrechungen**
  - <f> ↯ <irq> wie *call*, nur implizit
  - <irq> ***iret*** wie *ret*
- Unterbrechungen können als **implizit** erzeugte und aktivierte Routinen-Ausführungen verstanden werden.



Grundbegriffe: Koroutine

- **Koroutine** (engl. *Coroutine*): verallgemeinerte Routine
  - erlaubt zusätzlich: expliziten Austritt und Wiedereintritt
  - Sprachmittel einiger Programmiersprachen
    - z.B. Modula-2, Simula-67, Stackless Python
  - wird ausgeführt durch Koroutinen-Kontrollfluss
- **Koroutinen-Kontrollfluss**: eine Koroutinen-Ausführung
  - Kontrollfluss mit eigenem, unabhängigem Zustand
    - Stapel, Register
    - Im Prinzip ein eigenständiger Faden (engl. *Thread*) – **dazu später mehr**

Koroutinen und Koroutinen-Kontrollflüsse stehen ebenfalls in einer Schema-Instanz–Relation.

In der Literatur ist diese Unterscheidung unüblich. Koroutinen-Kontrollflüsse werden häufig ebenfalls als Koroutinen bezeichnet.

Grundbegriffe: Koroutine

- Koroutinen-Kontrollflüsse werden erzeugt, gesteuert und zerstört über zusätzliche **Elementaroperationen**
  - ***create*** g
    - **erzeugt** neue Koroutinen-Ausführung <g> von g
  - <f> ***resume*** <g>
    - **suspendiert** die Koroutinen-Ausführung <f>
    - **(re-)aktiviert** die Koroutinen-Ausführung <g>
  - ***destroy*** <g>
    - **zerstört** die Koroutinen-Ausführung <g>

Grundbegriffe: Koroutine

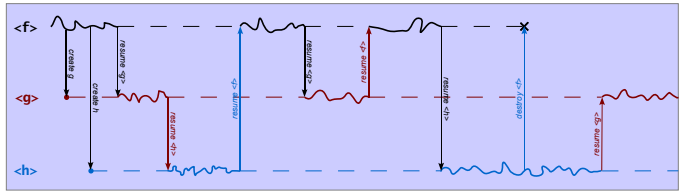
- Koroutinen-Kontrollflüsse werden erzeugt, gesteuert und zerstört über zusätzliche **Elementaroperationen**
  - ***create*** g
    - **erzeugt** neue Koroutinen-Ausführung <g> von g
  - <f> ***resume*** <g>
    - **suspendiert** die Koroutinen-Ausführung <f>
    - **(re-)aktiviert** die Koroutinen-Ausführung <g>
  - ***destroy*** <g>
    - **zerstört** die Koroutinen-Ausführung <g>

Unterschied zu Routinen-Kontrollflüssen:

Aktivierung und Reaktivierung sind zeitlich entkoppelt von Erzeugung und Zerstörung

Koroutinen → symmetrisches Fortsetzungssmodell

- Koroutinen-Kontrollflüsse bilden eine **Fortsetzungsfolge**
  - Zustand der Koroutine bleibt über Ein-/Austritte hinweg erhalten
- Alle Koroutinen-Kontrollflüsse sind **gleichberechtigt**
  - kooperatives Multitasking
  - Fortsetzungsreihenfolge ist beliebig



Legende Kontrollflusserzeugung: •
Kontrollflusszerstörung: ×
explizite Steuerung: ——→
implizite Steuerung: ·····→

Koroutinen und Programmfäden

- Koroutinen-Kontrollflüsse werden oft auch bezeichnet als
  - kooperative **Fäden** (engl. *cooperative **Threads***)
  - **Fasern** (engl. ***Fibers***)
- Das ist *im Prinzip* richtig, die Begriffe entstammen jedoch aus verschiedenen Welten
  - Koroutinen-Unterstützung ist historisch (eher) ein **Sprach**merkmal
  - Mehrfädigkeit ist historisch (eher) ein **Betriebssystem**merkmal
  - Die Grenzen sind fließend
    - *Sprachfunktion – (Laufzeit-)bibliothekfunktion – Betriebssystemfunktion*
- Wir verstehen Koroutinen als *technisches* Mittel
  - um Mehrfädigkeit im BS zu **implementieren**
  - insbesondere später auch nicht-kooperative Fäden

Agenda

- Motivation: Quasi-Parallelität
  - Einige Versuche
- Grundbegriffe
  - Routine und Kontrollfluss
  - Koroutine, Kontrollfluss und Programmfaden
  - asymmetrisches und symmetrisches Fortsetzungsmodell
- **Implementierung von Koroutinen**
  - **Fortsetzungen**
  - **Elementaroperationen**
- Ausblick
  - Koroutinen als Hilfsmittel für das BS
  - Mehrfädigkeit
- Zusammenfassung

Implementierung: Fortsetzungen

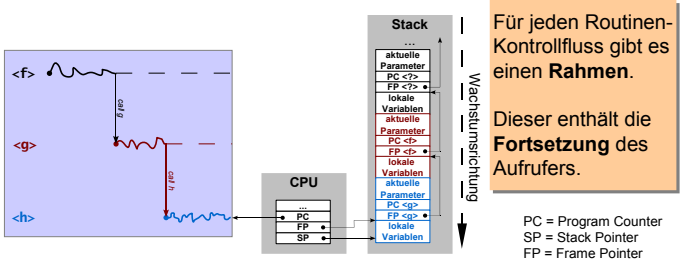
- **Fortsetzung** (engl. *Continuation*): Rest einer Ausführung
  - Eine Fortsetzung ist ein **Objekt**, das einen **suspendierten Kontrollfluss** repräsentiert.
    - Programmzähler, Register, lokale Variablen, ...
    - kurz: gesamter Kontrollflusszustand
  - wird benötigt, um den Kontrollfluss zu reaktivieren

Continuations sind ursprünglich entstanden als ein Beschreibungsmittel in der **denotationalen Semantik**.

Sprachen wie Haskell oder Scheme bieten *Continuations* als eigenes Sprachmittel an.

Routinen → asymmetrisches Fortsetzungsmodell

- Routinen-Fortsetzungen werden auf **dem Stapel** instantiiert
  - in Form von **Stapel-Rahmen**, erzeugt und zerstört durch
    - **Übersetzer** (und CPU) bei ***call***, ***ret***
    - **Kopplungsroutine** (und CPU) bei **Unterbrechung**, ***iret***
  - Stapel wird durch die Hardware (CPU-Stapel) bereitgestellt
    - Anweisungen wie call, ret, push, pop verwenden implizit diesen Stapel



Für jeden Routinen-Kontrollfluss gibt es einen **Rahmen**.

Dieser enthält die **Fortsetzung** des Aufrufers.

PC = Program Counter
SP = Stack Pointer
FP = Frame Pointer

Koroutinen → symmetrisches Fortsetzungssmodell

- Ein Koroutinen-Kontrollfluss benötigt einen eigenen Stapel
  - für lokale Variablen - sind Teil des Zustands
  - für Subroutinen-Aufrufe - darauf wollen wir nicht ganz verzichten
  - während der Ausführung ist dieser Stapel der CPU-Stapel

Koroutinen-Kontrollflüsse können demnach Routinen-Kontrollflüsse auf ihrem Stapel erzeugen und aktivieren!

Koroutinen → symmetrisches Fortsetzungssmodell

- Ein Koroutinen-Kontrollfluss benötigt einen eigenen Stapel
  - für lokale Variablen - sind Teil des Zustands
  - für Subroutinen-Aufrufe - darauf wollen wir nicht ganz verzichten
  - während der Ausführung ist dieser Stapel der CPU-Stapel
- **Ansatz:** Koroutinen-Fortsetzungen werden als **Stapel-Rahmen** auf **ihrem Stapel** instantiiert.
  - Ein Kontrollfluss-Kontext wird **repräsentiert** durch den Stapel.
  - Das oberste Stapelelement enthält immer die Fortsetzung.
  - Kontrollfluss-Wechsel entspricht Stapelwechsel und „Rücksprung“

Im Prinzip werden bei diesem Ansatz Koroutinen-Fortsetzungen mit Hilfe von Routinen-Fortsetzungen implementiert.

Implementierung: *resume*

- **Aufgabe:** Koroutinen-Kontrollfluss wechseln

```
// Typ für Stapelzeiger (Stapel ist Feld von void*)
typedef void** SP;

extern „C“ void resume( SP& from_sp, SP& to_sp ) {
  /* aktueller Stapel-Rahmen ist Fortsetzung des zu
     suspendierenden Kontrollflusses (Aufrufer von resume) */

  < sichere CPU-Stapelzeiger in from_sp >
  < lade CPU-Stapelzeiger aus to_sp >

  /* aktueller Stapel-Rahmen ist Fortsetzung des zu
     reaktivierenden Kontrollflusses */

} // Rücksprung
```

Implementierung: *resume*

- **Aufgabe:** Koroutinen-Kontrollfluss wechseln

```
// Typ für Stapelzeiger (Stapel ist Feld von void*)
typedef void** SP;

extern „C“ void resume( SP& from_sp, SP& to_sp ) {
  /* aktueller Stapel-Rahmen ist Fortsetzung des zu
     suspendierenden Kontrollflusses (Aufrufer von resume) */

  < sichere CPU-Stapelzeiger in from_sp >
  < lade CPU-Stapelzeiger aus to_sp >

  /* aktueller
     reaktivi

} // Rücksprun
```

Problem: nicht-flüchtige Register

Der Stapel-Rahmen enthält **keine nicht-flüchtigen Register**, da der Aufrufer davon ausgeht, dass diese nicht verändert werden.

Wir springen jedoch **in einen anderen Aufrufer** zurück.

Implementierung: *resume*

- **Problem:** nicht-flüchtige Register
  - Stapel-Rahmen enthält keine nicht-flüchtigen Register
  - also müssen diese extra gesichert und restauriert werden
- Implementierungsvarianten
  - nicht-flüchtige Register werden in eigener Struktur gesichert
  - oder einfach als „lokale Variablen“ auf dem Stapel:

```
extern „C“ void resume( SP& from_sp, SP& to_sp ) {
  /* aktueller Stapel-Rahmen ist Fortsetzung des zu
     suspendierenden Kontrollflusses (Aufrufer von resume) */
  < lege nicht-flüchtige Register auf den Stapel >
  < sichere CPU-Stapelzeiger in from_sp >
  < lade CPU-Stapelzeiger aus to_sp >
  < hole nicht-flüchtige Register vom Stapel >
  /* aktueller Stapel-Rahmen ist Fortsetzung des zu
     reaktivierenden Kontrollflusses */

} // Rücksprung
```

Implementierung: *resume*

- Implementierung von *resume* ist architekturabhängig
  - Aufbau der Stapel-Rahmen
  - nicht-flüchtige Register
  - Wachstumsrichtung des Stapels
- Außerdem muss man Register bearbeiten → **Assembler**

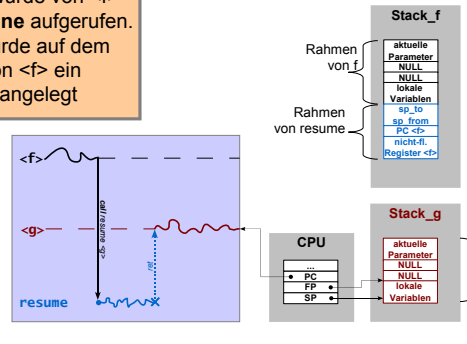
Beispiel Motorola 68000

```
// extern „C“ void resume( SP& sp_from, SP& sp_to )
resume:
  move.l 4(sp), a0              // a0 = &sp_from
  move.l 8(sp), a1              // a1 = &sp_to
  movem.l d2-d7/a2-a6, -(sp)    // nf-Register auf den Stapel
  move.l  sp, (a0)              // sp_from = sp
  move.l  (a1), sp              // sp = sp_to
  movem.l (sp)+, d2-d7/a2-a6    // hole nf-Register vom Stapel
  rts                           // „Rücksprung“
```

Beispiel: Verwendung von *resume*

- Koroutinen-Kontrollfuss <f> übergab an <g>
  - <f> ist suspendiert, <g> ist aktiv

resume wurde von <f> als **Routine** aufgerufen. Dabei wurde auf dem Stapel von <f> ein Rahmen angelegt



Rahmen von *resume* beschreibt Fortsetzung von <f>. Außerdem wurden die nicht-flüchtigen Register gespeichert.

PC = Program Counter
SP = Stack Pointer
FP = Frame Pointer

Implementierung: *create*

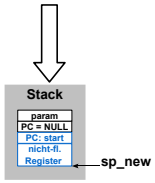
- **Aufgabe:** Koroutinen-Kontrollfluss <start> erzeugen
  - Wir brauchen
    - **Stapelspeicher** (irgendwo, global) `static void* stack_start[ 256 ];`
    - einen **Stapelzeiger** `SP sp_start = &stack_start[ 256 ];`
    - eine **Startfunktion** `void start( void* param ){...}`
    - **Parameter** für die Startfunktion
  - Koroutinen-Kontrollfuss wird suspendiert erzeugt
    - Stapel repräsentiert den Kontext
    - Erst durch ein *resume* soll die Ausführung beginnen
- **Ansatz:** ***create*** erzeugt zwei Stapel-Rahmen
  - so als hätte die Startfunktion schon einmal *resume* aufgerufen:
    - den Rahmen der Startfunktion (erzeugt vom „virtuellen Aufrufer“)
    - den Rahmen von *resume* (enthält Fortsetzung in der Startfunktion)
  - Erstes *resume* macht „Rücksprung“ an den Beginn der Startfunktion

Implementierung: *create*

Beispiel Motorola 68000

```
void create( SP& sp_new, void (*start)(void*), void* param) {
  *(--sp_new) = param; // Parameter von Startfunktion
  *(--sp_new) = 0;     // Aufrufer (gibt es nicht!)

  *(--sp_new) = start; // Startadresse
  sp_new -= 11;        // nicht-flüchtige Register (Werte egal)
}
```

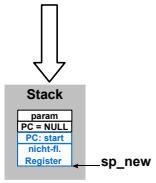


Implementierung: *create*

Beispiel Motorola 68000

```
void create( SP& sp_new, void (*start)(void*), void* param) {
  *(--sp_new) = param; // Parameter von Startfunktion
  *(--sp_new) = 0;     // Aufrufer (gibt es nicht!)

  *(--sp_new) = start; // Startadresse
  sp_new -= 11;        // nicht-flüchtige Register (Werte egal)
}
```



Da der Rücksprung an den **Anfang** einer Funktion erfolgt, sind die Rahmen sehr einfach aufgebaut.

Zu diesem Fortsetzungspunkt hat eine Funktion
- noch keinen lokalen Variablen (und somit auch keinen FP) auf den Stapel gelegt
- keine Parameter (für resume) auf den Stapel gelegt
- keine Annahmen über die Inhalte von nf-Registern

Implementierung: *destroy*

- **Aufgabe:** Koroutinen-Kontrollfluss zerstören
- **Ansatz:** Kontrollfluss-Kontext freigeben
  - entspricht Freigabe der Kontextvariablen (Stapelzeiger)
  - Stapelspeicher kann anschließend anderweitig verwendet werden

Das ist wenigstens mal einfach :-)

Agenda

- Motivation: Quasi-Parallelität
  - Einige Versuche
- Grundbegriffe
  - Routine und Kontrollfluss
  - Koroutine, Kontrollfluss und Programmfaden
  - asymmetrisches und symmetrisches Fortsetzungsmodell
- Implementierung von Koroutinen
  - Fortsetzungen
  - Elementaroperationen
- **Ausblick**
  - **Koroutinen als Hilfsmittel für das BS**
  - **Mehrfädigkeit**
- Zusammenfassung

Ausblick: Betriebssystemfäden

- Koroutinen sind (eigentlich) ein Sprachkonzept
  - Multitasking auf der Sprachebene
  - wir haben es hier für C „nachgerüstet“
  - Kontextwechsel erfordert keine Systemprivilegien (muss also auch nicht zwingend im BS-Kern erfolgen)
- Vorraussetzung für Multitasking ist jedoch: **Kooperation**
  - Anwendungen müssen als Koroutinen implementiert werden
  - Anwendungen müssen sich gegenseitig kennen
  - Anwendungen müssen sich gegenseitig aktivieren

Für den uneingeschränkten Mehrprogramm-Betrieb ist das **unrealistisch**!

Ausblick: Betriebssystemfäden

- **Alternative**: „Kooperationsfähigkeit“ als Aufgabe des Betriebsystems auffassen
- **Ansatz:** Anwendungen „unbemerkt“ als eigenständige Fäden ausführen
  - **BS** sorgt für die **Erzeugung** der Koroutinen-Kontrollflüsse
    - jede Anwendung wird als Routine aus einer **BS-Koroutine** aufgerufen
    - so dass indirekt jede Anwendung als Koroutine implementiert ist
  - **BS** sorgt für die **Suspendierung** laufender Koroutinen-Kontrollflüsse
    - so dass Anwendungen nicht kooperieren müssen
    - erfordert einen **Verdrängungsmechanismus**
  - **BS** sorgt für die **Auswahl** des nächsten Koroutinen-Kontrollflusses
    - so dass Anwendungen sich nicht gegenseitig kennen müssen
    - erfordert einen **Scheduler**

Ausblick: Betriebssystemfäden

- **Alternative**: „Kooperationsfähigkeit“ als Aufgabe des Betriebsystems auffassen
- **Ansatz:** Anwendungen „unbemerkt“ als eigenständige Fäden ausführen
  - BS sorgt [...]sse
    - jede Anw[...]aufgerufen
    - so dass i[...]rt ist
  - BS sorgt [...]-Kontrollflüsse
    - so dass Anwendungen nicht kooperieren müssen
    - erfordert einen **Verdrängungsmechanismus**
  - BS sorgt für die **Auswahl** des nächsten Koroutinen-Kontrollflusses
    - so dass Anwendungen sich nicht gegenseitig kennen müssen
    - erfordert einen **Scheduler**

Dazu mehr in der Übung und in der nächsten Vorlesung

Agenda

- Motivation: Quasi-Parallelität
  - Einige Versuche
- Grundbegriffe
  - Routine und Kontrollfluss
  - Koroutine, Kontrollfluss und Programmfaden
  - asymmetrisches und symmetrisches Fortsetzungsmodell
- Implementierung von Koroutinen
  - Fortsetzungen
  - Elementaroperationen
- Ausblick
  - Koroutinen als Hilfsmittel für das BS
  - Mehrfädigkeit
- **Zusammenfassung**

Zusammenfassung

- Unser Ziel war die Ermöglichung von „Quasi-Parallelität“
  - Funktionen „abwechselnd“ jeweils „ein wenig“ ausführen
    - Suspendierung und Reaktivierung von Funktions-Ausführungen
    - Begriff der Fortsetzung
- Routinen → asymmetrisches Fortsetzungsmodell
  - Ausführung in LIFO-Reihenfolge (und damit nicht „quasi-parallel“)
  - CPU und Übersetzer stellen die Elementaroperationen bereit
- Koroutinen → symmetrisches Fortsetzungsmodell
  - Ausführung in beliebiger Reihenfolge
    - erfordert eigenen Kontext: Register, Stapel
  - Elementaroperationen i.a. nicht durch CPU/Übersetzer bereitgestellt
- Fäden sind vom BS verwaltete Koroutinen