Betriebssysteme (BS)

VL 8.3 – Koroutinen und Fäden – Implementierung

Volkmar Sieh / **Daniel Lohmann**

Lehrstuhl für Informatik 4
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen Nürnberg

WS 20 – 14. Dezember 2020

https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS20/V_BS

Agenda

- Motivation
- Grundbegriffe
- Implementierung
  - Fortsetzungen
  - Elementaroperationen
- Ausblick
- Zusammenfassung
- Referenzen

Implementierung: Fortsetzungen

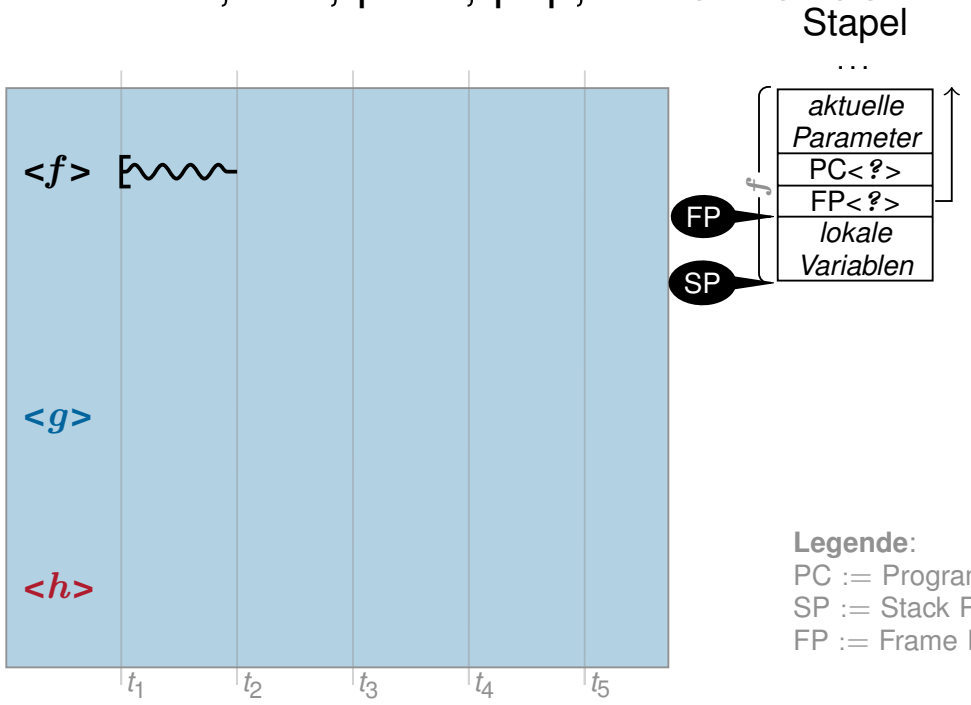
- Fortsetzung (engl. *Continuation*): Rest einer Ausführung
  - Eine Fortsetzung ist ein Objekt, das einen suspendierten Kontrollfluss repräsentiert.
    - Programmzähler, Register, lokale Variablen, ...
    - kurz: gesamter Kontrollflusszustand
  - wird benötigt, um den Kontrollfluss zu reaktivieren

Anmerkung: Fortsetzungen

- Continuations sind ursprünglich entstanden als ein Beschreibungsmittel der **denotationalen Semantik** [3].
- Sprachen wie Haskell oder Scheme bieten Continuations als eigenes Sprachmittel an.

Routinen ↦ asymmetrisches Fortsetzungsmodell

- Routinen-Fortsetzungen werden i. a. auf einem **Stapel** instantiiert
  - in Form von Stapel-Rahmen, erzeugt und zerstört durch
    - Compiler (explizit) und CPU (implizit) bei *call*, *ret*
    - Kopplungsfunktion (explizit) und CPU (implizit) bei ↯, *iret*
  - Der Compiler verwendet dafür i. a. den CPU-Stapel
    - `call`, `ret`, `push`, `pop`, ... verwenden implizit den CPU-Stapel

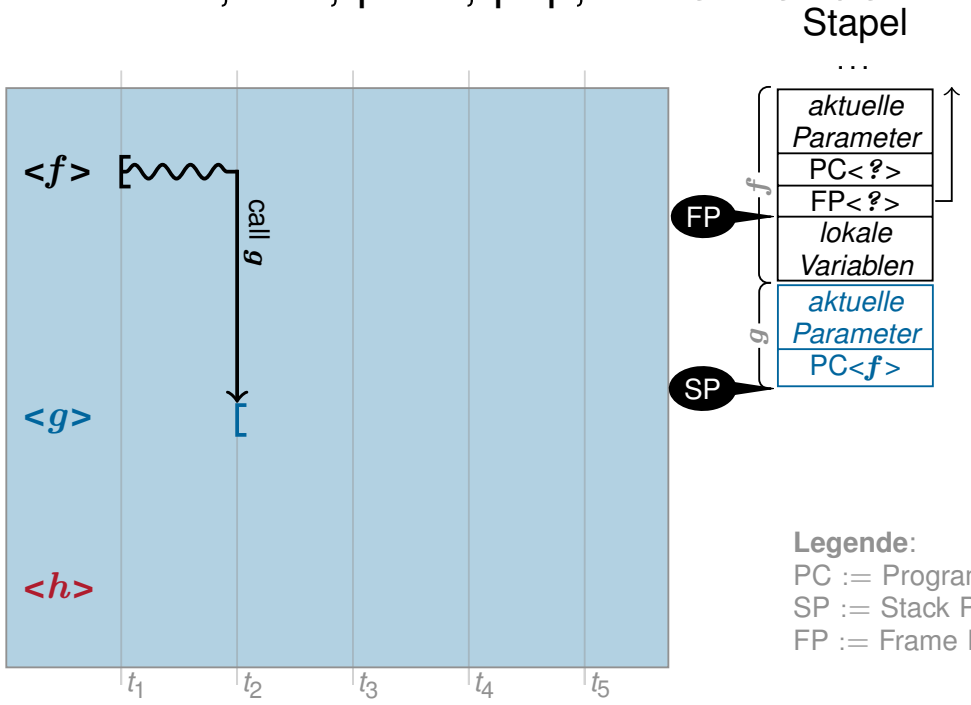


Legende:
PC := Programm Counter
SP := Stack Pointer
FP := Frame Pointer

Für jeden Routinen-Kontrollfluss legen **CPU** und **Compiler** einen **Rahmen** an. Dieser enthält die **Fortsetzung** des Aufrufers.

Routinen ↦ asymmetrisches Fortsetzungsmodell

- Routinen-Fortsetzungen werden i. a. auf einem **Stapel** instantiiert
  - in Form von Stapel-Rahmen, erzeugt und zerstört durch
    - Compiler (explizit) und CPU (implizit) bei *call*, *ret*
    - Kopplungsfunktion (explizit) und CPU (implizit) bei ↯, *iret*
  - Der Compiler verwendet dafür i. a. den CPU-Stapel
    - `call`, `ret`, `push`, `pop`, ... verwenden implizit den CPU-Stapel

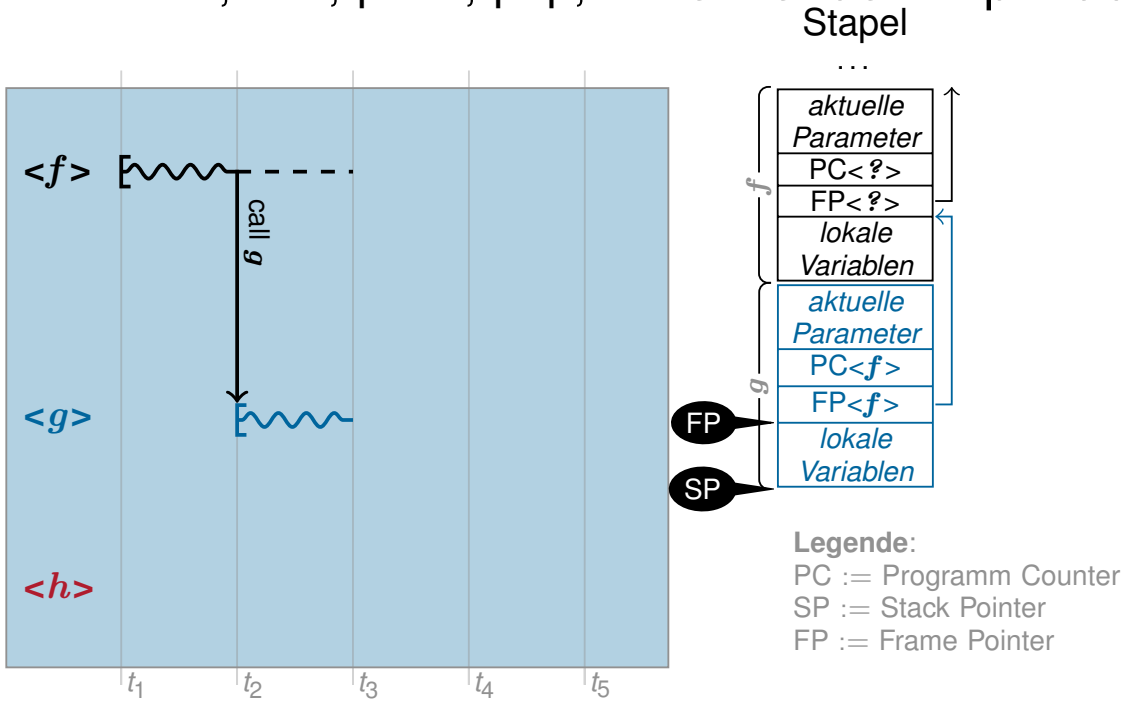


Legende:
PC := Programm Counter
SP := Stack Pointer
FP := Frame Pointer

Für jeden Routinen-Kontrollfluss legen **CPU** und **Compiler** einen **Rahmen** an. Dieser enthält die **Fortsetzung** des Aufrufers.

Routinen ↦ asymmetrisches Fortsetzungsmodell

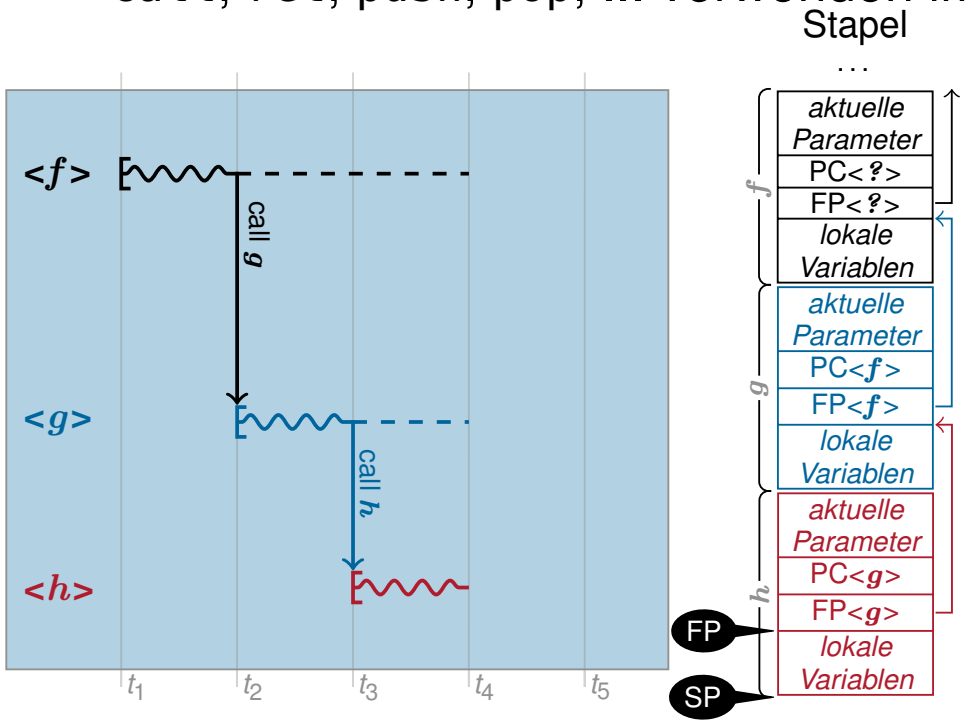
- Routinen-Fortsetzungen werden i. a. auf einem **Stapel** instantiiert
  - in Form von Stapel-Rahmen, erzeugt und zerstört durch
    - Compiler (explizit) und CPU (implizit) bei *call*, *ret*
    - Kopplungsfunktion (explizit) und CPU (implizit) bei ↯, *iret*
  - Der Compiler verwendet dafür i. a. den CPU-Stapel
    - `call`, `ret`, `push`, `pop`, ... verwenden implizit den CPU-Stapel



Für jeden Routinen-Kontrollfluss legen **CPU** und **Compiler** einen **Rahmen** an. Dieser enthält die **Fortsetzung** des Aufrufers.

Routinen ↦ asymmetrisches Fortsetzungsmodell

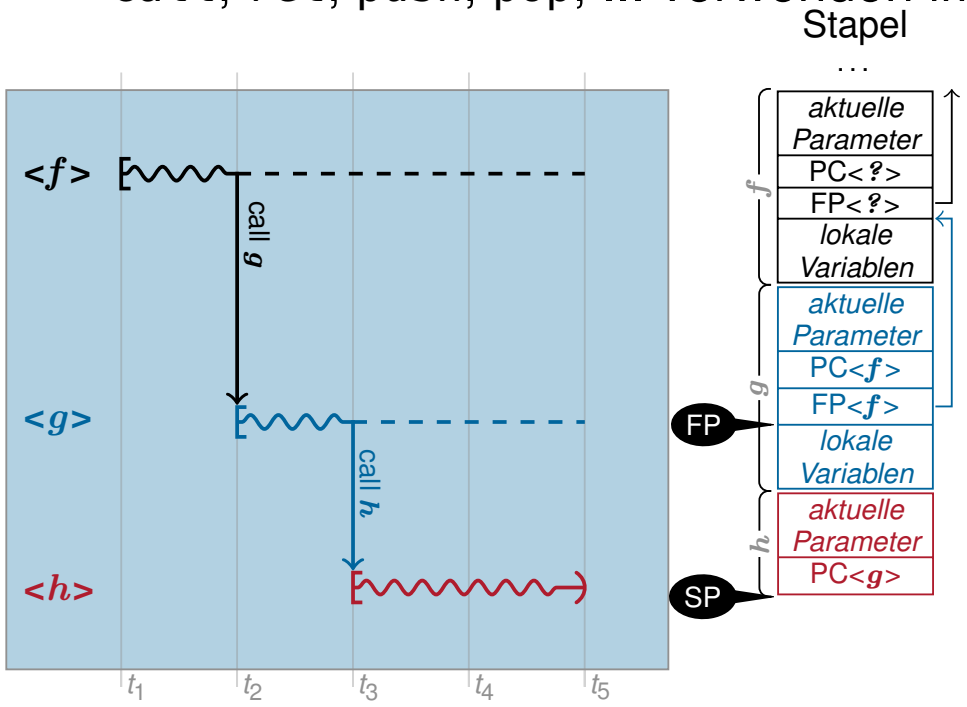
- Routinen-Fortsetzungen werden i. a. auf einem **Stapel** instantiiert
  - in Form von Stapel-Rahmen, erzeugt und zerstört durch
    - Compiler (explizit) und CPU (implizit) bei *call*, *ret*
    - Kopplungsfunktion (explizit) und CPU (implizit) bei ↯, *iret*
  - Der Compiler verwendet dafür i. a. den CPU-Stapel
    - `call`, `ret`, `push`, `pop`, ... verwenden implizit den CPU-Stapel



Für jeden Routinen-Kontrollfluss legen **CPU** und **Compiler** einen **Rahmen** an. Dieser enthält die **Fortsetzung** des Aufrufers.

Routinen ↦ asymmetrisches Fortsetzungsmodell

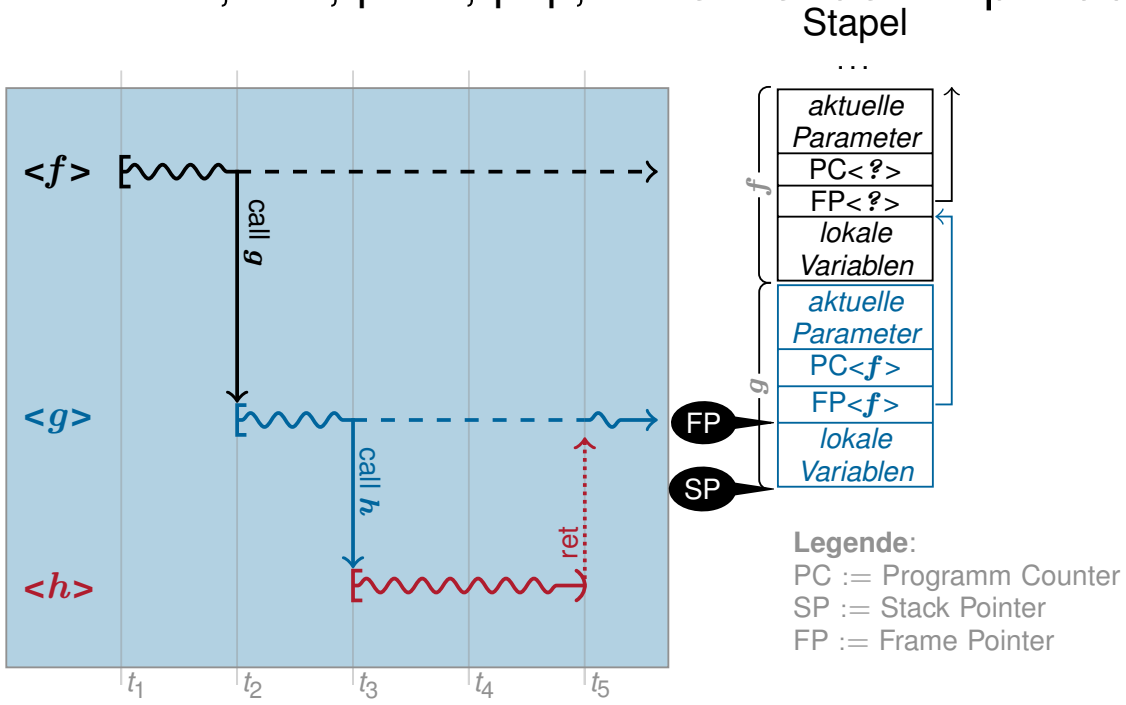
- Routinen-Fortsetzungen werden i. a. auf einem **Stapel** instantiiert
  - in Form von Stapel-Rahmen, erzeugt und zerstört durch
    - Compiler (explizit) und CPU (implizit) bei *call*, *ret*
    - Kopplungsfunktion (explizit) und CPU (implizit) bei ↯, *iret*
  - Der Compiler verwendet dafür i. a. den CPU-Stapel
    - `call`, `ret`, `push`, `pop`, ... verwenden implizit den CPU-Stapel



Für jeden Routinen-Kontrollfluss legen **CPU** und **Compiler** einen **Rahmen** an. Dieser enthält die **Fortsetzung** des Aufrufers.

Routinen ↦ asymmetrisches Fortsetzungsmodell

- Routinen-Fortsetzungen werden i. a. auf einem **Stapel** instantiiert
  - in Form von Stapel-Rahmen, erzeugt und zerstört durch
    - Compiler (explizit) und CPU (implizit) bei *call*, *ret*
    - Kopplungsfunktion (explizit) und CPU (implizit) bei ϟ, *iret*
  - Der Compiler verwendet dafür i. a. den CPU-Stapel
    - `call`, `ret`, `push`, `pop`, ... verwenden implizit den CPU-Stapel



Für jeden Routinen-Kontrollfluss legen **CPU** und **Compiler** einen **Rahmen** an. Dieser enthält die **Fortsetzung** des Aufrufers.

Koroutinen ↦ symmetrisches Fortsetzungsmodell

- Koroutinen-Fortsetzungen werden i. a. nicht nativ unterstützt
- **Ansatz:** Koroutinen-Fortsetzungen durch Routinen-Fortsetzungen implementieren [2]
  - Ein *resume*-Aufruf sieht für den Compiler wie die Erzeugung und Aktivierung eines ganz normalen Routinen-Kontrollflusses aus.
  - Vor dem `ret` wird in *resume* jedoch intern der Koroutinen-Kontrollfluss gewechselt.
- **Folge:** Technisch gesehen, müssen wir das Routinen-Fortsetzungsmodell des Compilers bereitstellen
  - Registerverwendung ⇝ nichtflüchte Register über Wechsel erhalten
  - Fortsetzungs-Stapel ⇝ eigener Stapel für jede Koroutinen-Instanz

Eine Koroutinen-Instanz wird durch ihren Fortsetzungs-Stapel repräsentiert

- während der Ausführung ist dieser Stapel der CPU-Stapel
- oberster Stapel-Rahmen enthält immer die Fortsetzung
- Koroutinen-Wechsel ↦ Stapel-Wechsel + `ret`

Implementierung: *resume*

- Aufgabe: Koroutinen-Kontrollfluss wechseln

```
// Typ fuer 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 */

} // Ruecksprung
```

Implementierung: *resume*

- Aufgabe: Koroutinen-Kontrollfluss wechseln

```
// Typ fuer 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 */

} // Ruecksprung
```

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
  - Routinen-Fortsetzung enthält keine nicht-flüchtigen Register
  - $\rightsquigarrow$ diese müssen explizit gesichert und restauriert werden
- Viele Implementierungsvarianten sind denkbar
  - nicht-flüchtige Register in eigener Struktur sichern ($\rightsquigarrow$ Übung)
  - 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-fluechtige Register auf den Stapel >
  < sichere CPU-Stapelzeiger in from_sp >
  < lade CPU-Stapelzeiger aus to_sp >
  <hole nicht-fluechtige Register vom Stapel >
  /* aktueller Stapel-Rahmen ist Fortsetzung des zu
     reaktivierenden Kontrollflusses */

} // Ruecksprung
```

Implementierung: *resume*

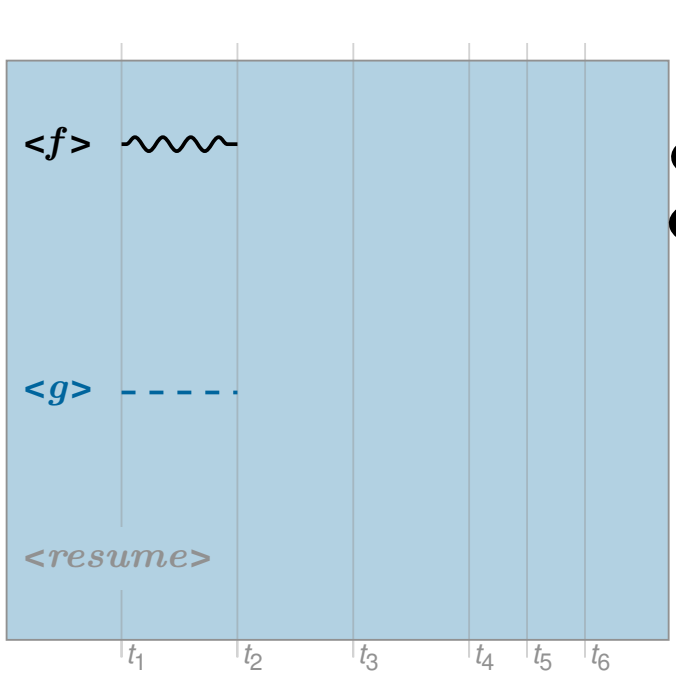
- Implementierung vom *resume* ist architekturabhängig
  - Aufbau der Stapel-Rahmen
  - nicht-flüchtige Register
  - Wachstumsrichtung des Stapels
- Außerdem muss man Register bearbeiten $\rightsquigarrow$ Assembler

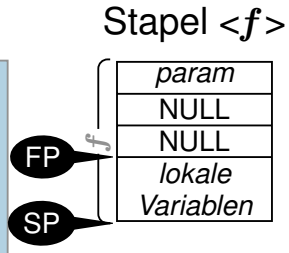
Beispiel Motorola 68000:

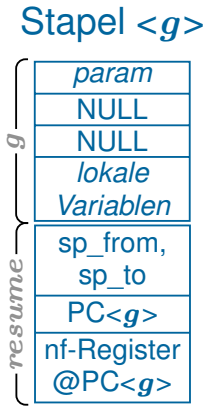
```
// extern "C" void resume( SP& sp_from, SP& sp_to )
resume:
  move.l  4(sp), a0             // a0 = &sp_from
  move.l  8(sp), a1             // a1 = &sp_to
  movem.l d2-d7/a2-a6, -(sp)    // nf-Register auf den Stapel
  move.l  sp, (a0)              // sp_from = sp
  move.l  (a1), sp            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

Beispiel: Verwendung von *resume*

Koroutinen-Kontrollfluss <f> übergibt an <g>:





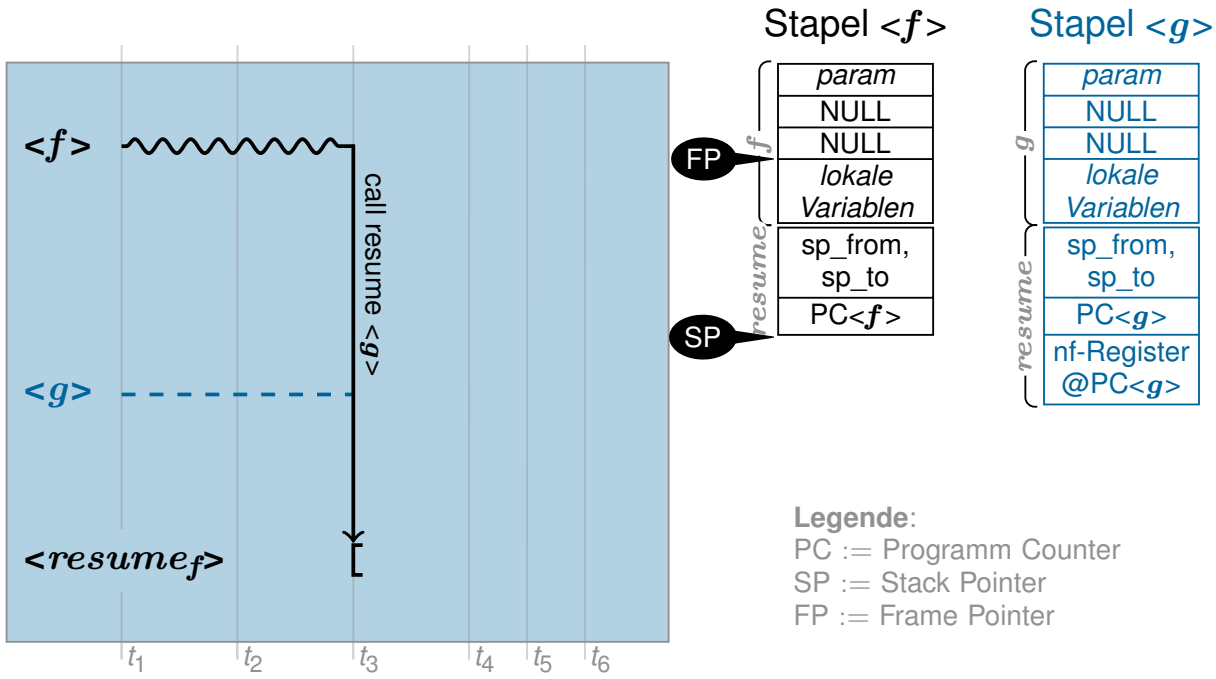


Legende:
PC := Programm Counter
SP := Stack Pointer
FP := Frame Pointer

1. Koroutine <f> ist aktiv, Koroutine <g> ist suspendiert

Beispiel: Verwendung von *resume*

Koroutinen-Kontrollfluss <f> übergibt an <g>:

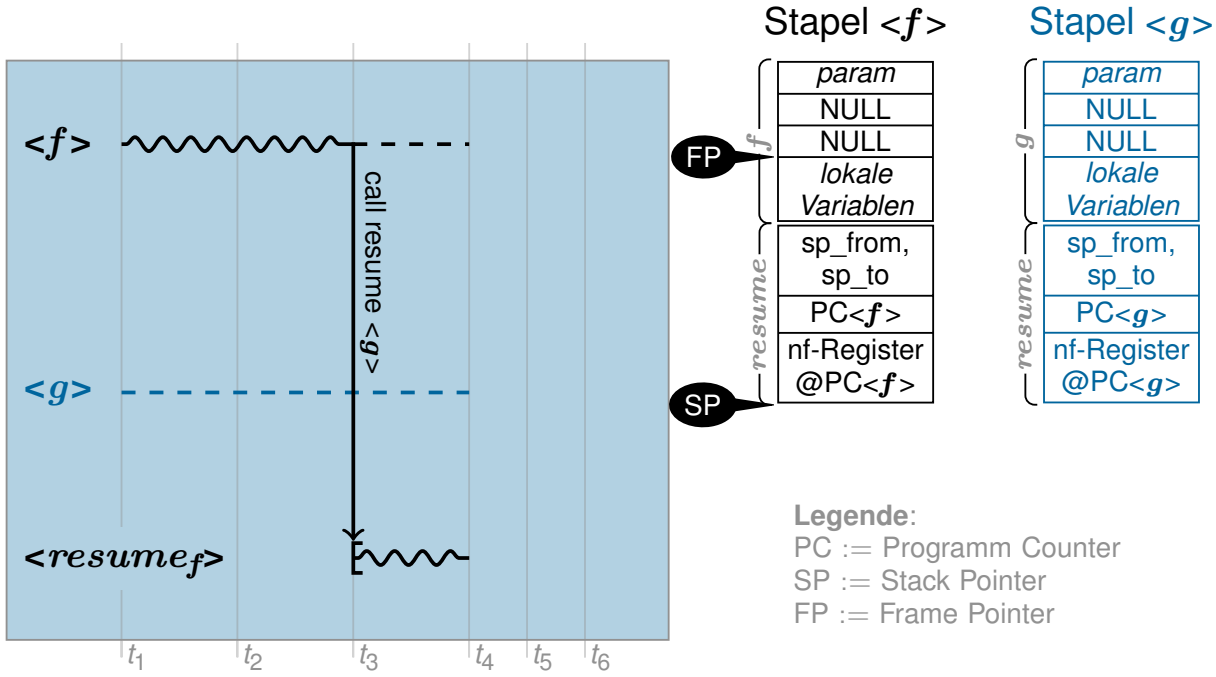


Legende:
PC := Programm Counter
SP := Stack Pointer
FP := Frame Pointer

1. Koroutine <f> ist aktiv, Koroutine <g> ist suspendiert
2. <f> instantiiert den Routinen-Kontrollfluss <$resume_f$> und legt dazu Parameter (Stapelvariablen von <f> und <g>) sowie die Rücksprung-Adresse ($\mapsto$ Fortsetzung von <f>) auf den Stapel.

Beispiel: Verwendung von *resume*

Koroutinen-Kontrollfluss <f> übergibt an <g>:

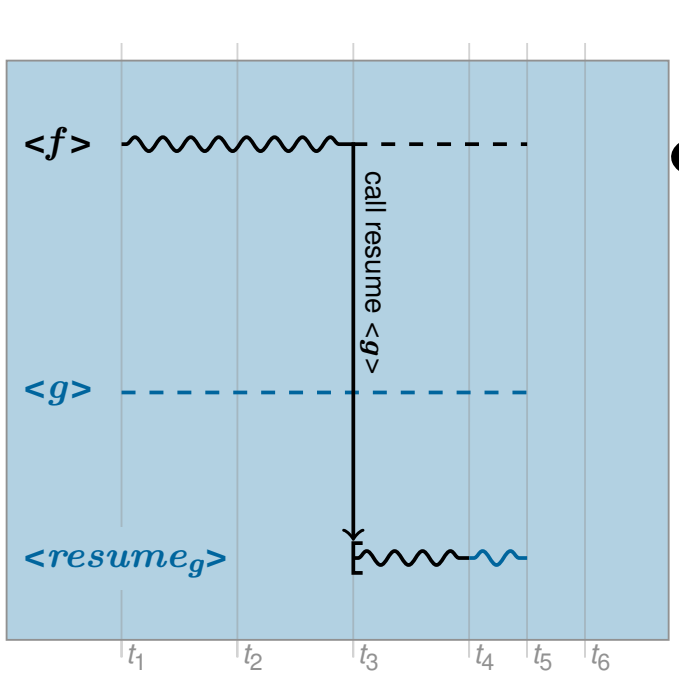


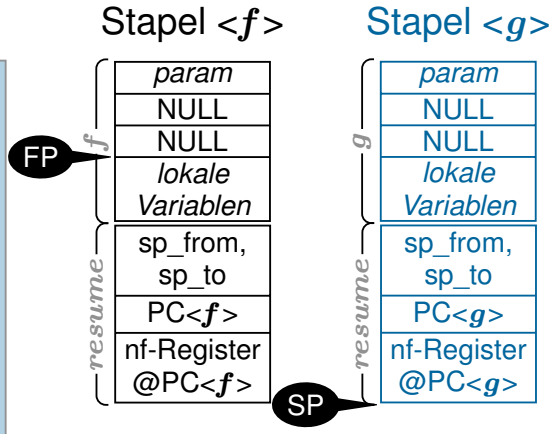
Legende:
PC := Programm Counter
SP := Stack Pointer
FP := Frame Pointer

1. Koroutine <f> ist aktiv, Koroutine <g> ist suspendiert
2. <f> instantiiert den Routinen-Kontrollfluss <$resume_f$> und legt dazu Parameter (Stapelvariablen von <f> und <g>) sowie die Rücksprung-Adresse ($\mapsto$ Fortsetzung von <f>) auf den Stapel.
3. <$resume_f$> sichert nicht-flüchtige Register von <f> auf dem Stapel und eigenen SP in `sp_from`

Beispiel: Verwendung von *resume*

Koroutinen-Kontrollfluss <f> übergibt an <g>:



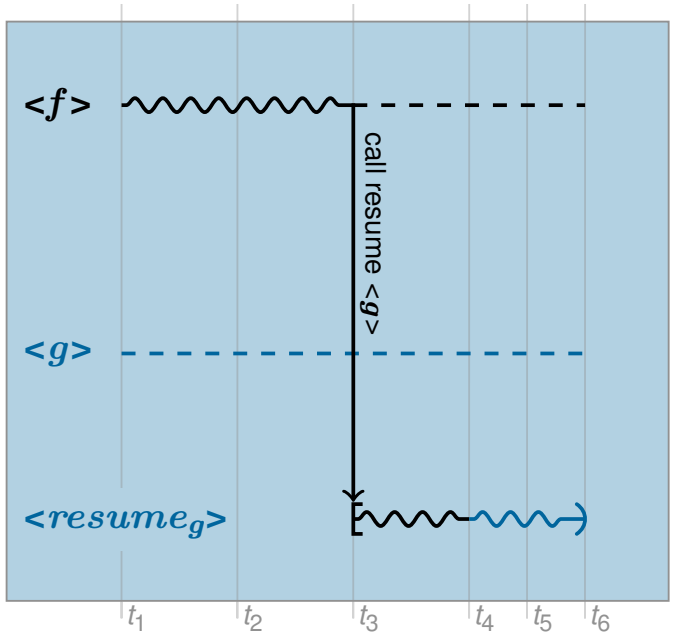


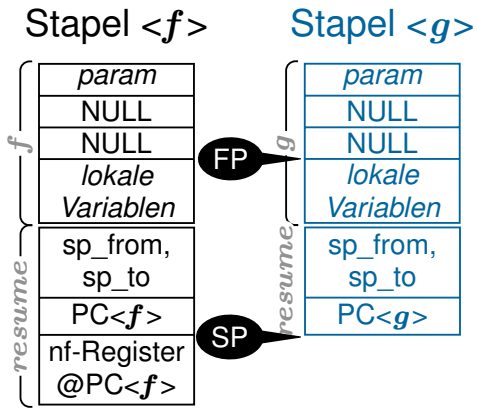
Legende:
PC := Programm Counter
SP := Stack Pointer
FP := Frame Pointer

1. Koroutine <f> ist aktiv, Koroutine <g> ist suspendiert
2. <f> instantiiert den Routinen-Kontrollfluss <$resume_f$> und legt dazu Parameter (Stapelvariablen von <f> und <g>) sowie die Rücksprung-Adresse ($\mapsto$ Fortsetzung von <f>) auf den Stapel.
3. <$resume_f$> sichert nicht-flüchtige Register von <f> auf dem Stapel und eigenen SP in `sp_from`
4. Wechsel des SP auf den Stapel von <g> (`sp_to`) $\rightsquigarrow$ **Koroutinen-Wechsel**, nun läuft <$resume_g$>

Beispiel: Verwendung von *resume*

Koroutinen-Kontrollfluss <f> übergibt an <g>:



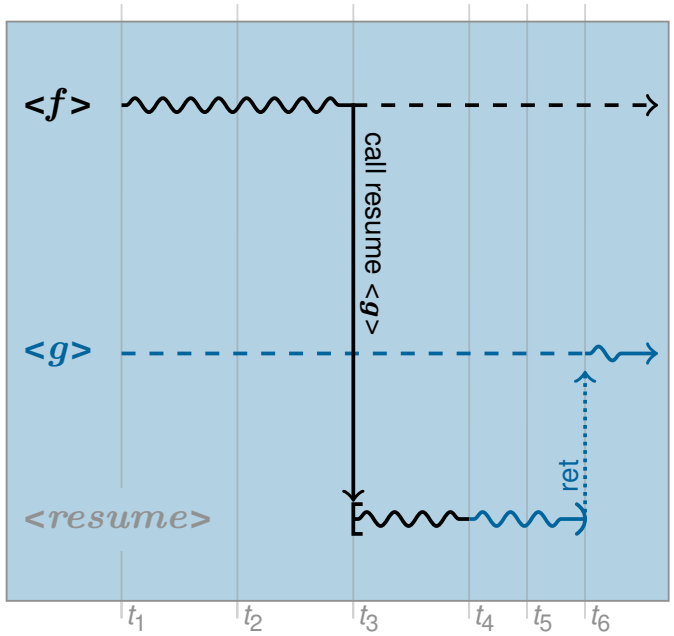


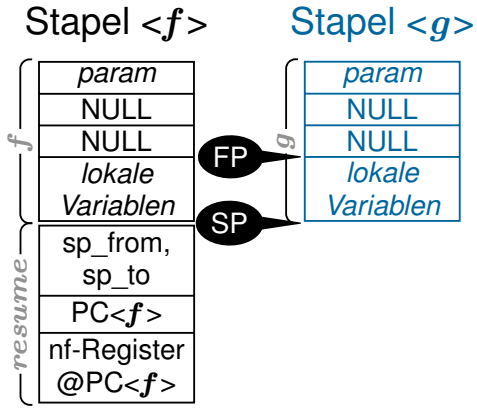
Legende:
PC := Programm Counter
SP := Stack Pointer
FP := Frame Pointer

1. Koroutine <f> ist aktiv, Koroutine <g> ist suspendiert
2. <f> instantiiert den Routinen-Kontrollfluss <$resume_f$> und legt dazu Parameter (Stapelvariablen von <f> und <g>) sowie die Rücksprung-Adresse ($\mapsto$ Fortsetzung von <f>) auf den Stapel.
3. <$resume_f$> sichert nicht-flüchtige Register von <f> auf dem Stapel und eigenen SP in `sp_from`
4. Wechsel des SP auf den Stapel von <g> (`sp_to`) $\rightsquigarrow$ **Koroutinen-Wechsel**, nun läuft <$resume_g$>
5. <$resume_g$> holt nicht-flüchtige Register von <g> vom Stapel.

Beispiel: Verwendung von *resume*

Koroutinen-Kontrollfluss <f> übergibt an <g>:





Legende:
PC := Programm Counter
SP := Stack Pointer
FP := Frame Pointer

1. Koroutine <f> ist aktiv, Koroutine <g> ist suspendiert
2. <f> instantiiert den Routinen-Kontrollfluss <$resume_f$> und legt dazu Parameter (Stapelvariablen von <f> und <g>) sowie die Rücksprung-Adresse ($\mapsto$ Fortsetzung von <f>) auf den Stapel.
3. <$resume_f$> sichert nicht-flüchtige Register von <f> auf dem Stapel und eigenen SP in `sp_from`
4. Wechsel des SP auf den Stapel von <g> (`sp_to`) $\rightsquigarrow$ **Koroutinen-Wechsel**, nun läuft <$resume_g$>
5. <$resume_g$> holt nicht-flüchtige Register von <g> vom Stapel.
6. Routinen-Kontrollfluss <$resume_g$> terminiert mit `ret`: <g> ist aktiv, <f> ist suspendiert

Implementierung: *create*

- Aufgabe: Koroutionen-Kontrollfluss <$start$> erzeugen
  - Gebraucht wird dafür
    1. **Stapelspeicher** (irgendwo, global)
    2. **Stapelzeiger**
    3. **Startfunktion**
    4. **Parameter** für die Startfunktion

```
static void* stack_start[ 256 ];
SP sp_start = &stack_start[ 256 ];
void start( void* param ) ...
```

  - Koroutinen-Kontrollfluss wird suspendiert erzeugt
- Ansatz: *create* erzeugt zwei Stapel-Rahmen
  - so als hätte <$start$> bereits *resume* **als Routine** aufgerufen
    1. Rahmen der Startfunktion selber (erzeugt vom „virtuellen Aufrufer”)
    2. Rahmen von *resume* (enthält Fortsetzung in <$start$>)
  - erstes *resume* macht „Rücksprung” an den Beginn von $start$

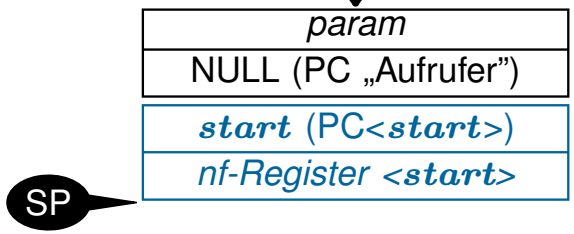
Implementierung: *create*

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-fluechtige Register (Werte egal)
}
```

ergibt



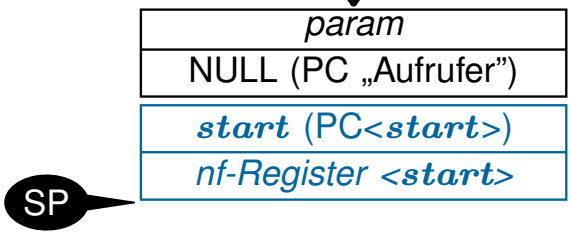
Implementierung: *create*

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-fluechtige Register (Werte egal)
}
```

ergibt



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

Zu diesem Fortsetzungspunkt hat ein Routinen-Kontrollfluss noch:

- keinen FP verwendet oder gesichert
- keine lokalen Variablen auf dem Stapel angelegt
- keine Annahmen über den Inhalt von nf-Registern

Implementierung: *destroy*

- Aufgabe: Koroutionen-Kontrollfluss zerstören
- Ansatz: Kontrollfluss-Kontext freigeben
  - entspricht Freigabe der Kontextvariablen ($\mapsto$ Stapelzeiger)
  - Stapelspeicher kann anschließend anderweitig verwendet werden

Das ist wenigstens mal einfach :-)