

# Betriebssysteme (BS)

## Koroutinen und Fäden

Daniel Lohmann

Lehrstuhl für Informatik 4  
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

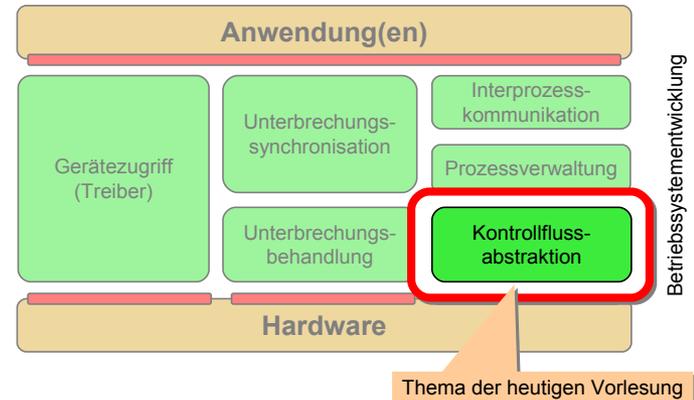


### Agenda

- 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



# Überblick: Vorlesungen



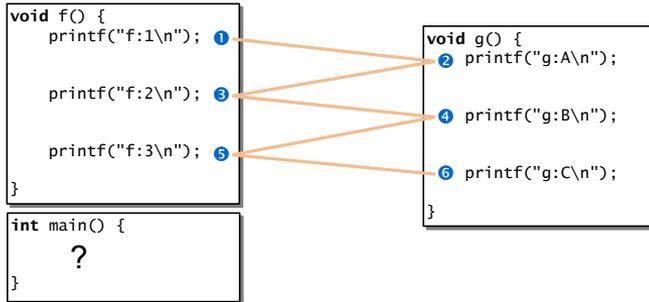
### Agenda

- **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@fai48a>gcc routine.c -o routine
lohmann@fai48a>./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@fai48a>gcc routine.c -o routine
lohmann@fai48a>./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@fai48a>gcc routine.c -o routine
lohmann@fai48a>./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 = &&11; goto *g;

11: printf("f:2\n");
    f = &&12; goto *g;

12: 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 = &&11; goto *f;

11: printf("g:B\n");
    g = &&12; goto *f;

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

Und so?



## Motivation: Quasi-Parallelität – Versuch 4

```
void f_start() {
    printf("f:1\n");
    f = &&11; goto *g;

11: printf("f:2\n");
    f = &&12; goto *g;

12: 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 = &&11; goto *f;

11: printf("g:B\n");
    g = &&12; goto *f;

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

```
lohmann@fai48a>gcc-2.95 -fomit-frame-
pointer -o coroutine coroutine.c
lohmann@fai48a>./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 = &&11; goto *g;

11: printf("f:2\n");
    f = &&12; goto *g;

12: 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 = &&11; goto *f;

11: printf("g:B\n");
    g = &&12; goto *f;

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

```
lohmann@fai48a>gcc-2.95 -fomit-frame-
pointer -o coroutine coroutine.c
lohmann@fai48a>./coroutine
f:1
g:A
f:2
g:B
f:3
g:C
```

Warum?

**Bitte nicht zuhause nachmachen!**



## Quasi-Parallelität: Erstes Fazit

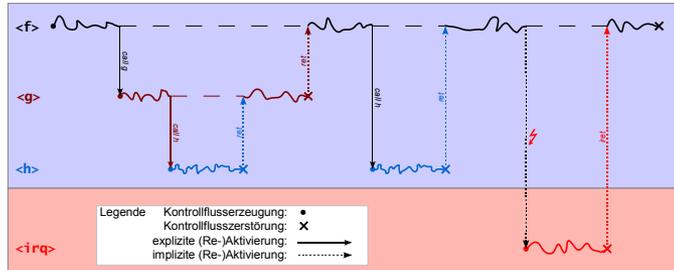
- Quasi-Parallelität zwischen zwei Funktions-Ausführungen kann nicht erreicht werden durch Funktionsaufrufe
  - einfache Funktionsaufrufe (Versuche 1 und 2)
    - → laufen immer komplett durch
  - rekursive Funktionsaufrufe (Versuch 3)
    - → dito, deshalb Endlosrekursion und Stapelüberlauf
- Wir brauchen 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?





## 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>

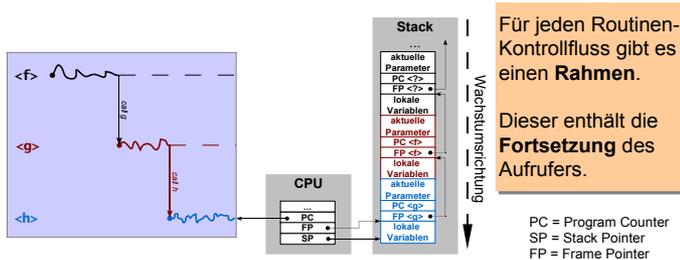
**Unterschied zu Routinen-Kontrollflüssen:**

Aktivierung und Reaktivierung sind zeitlich entkoppelt von Erzeugung und Zerstörung



## 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, irect**
  - Stapel wird durch die Hardware (CPU-Stapel) bereitgestellt
    - Anweisungen wie call, ret, push, pop verwenden implizit diesen Stapel



## Koroutinen → symmetrisches Fortsetzungsmodell

- 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 Fortsetzungsmodell

- 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 Stapелеlement 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 >

    /* aktuellen reaktivierenden Kontrollfluss */
} // Rücksprung
```

### 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**

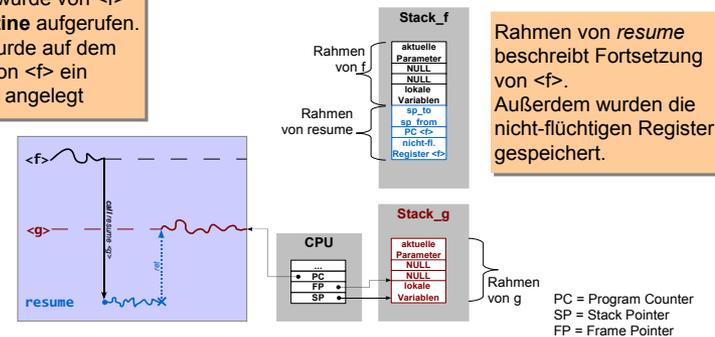
### Beispiel Motorola 68000

```
// 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-Kontrollfluss <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.

## 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-Kontrollfluss 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

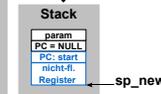


## Implementierung: create

### 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

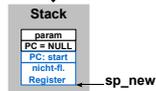
```
void create( SP& sp_new, void (*start)(void*), void* param) {
    *(&sp_new) = param; // Parameter von Startfunktion
    *(&sp_new) = 0;     // Aufrufer (gibt es nicht!)

    *(&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)
- Voraussetzung 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 Betriebssystems 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 Betriebssystems 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**

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

