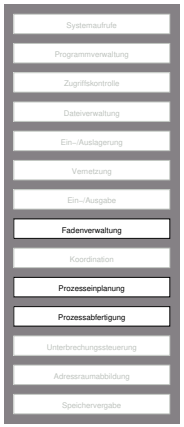
Prozessverwaltung



Pro'zess <m.; -es, -e> *Vorgang*, *Ablauf* [lat.]

Fadenverwaltung ∼inkarnation, ∼deskriptor
☞ Aktivitätsträger, Koroutine

∼**abfertigung** (*process dispatching*)
☞ CPU-Stoß (*CPU burst*) vs. E/A-Stoß (*I/O burst*)

∼**einplanung** (*CPU/process scheduling*)
☞ Klassifikation, Einplanungsebenen und -strategien

☞ Aspekte der Nebenläufigkeit (*race hazards/conditions*)

Prozessinkarnation

- die *Verwaltungseinheit* zur Beschreibung/Repräsentation eines Prozesses
  - der Typ einer Datenstruktur „**Prozessdeskriptor**“ (PD)
    ☞ Prozesskontrollblock (*process control block*, PCB), . . .
    ☞ UNIX Jargon: *proc structure* (von „`struct proc`“)
  - Kopf eines (komplexen) Datenstrukturgeflechts (☞ Objektkomposition)
- das (Software-) *Betriebsmittel* zur Ausführung eines Programms
  - eine Instanz vom Typ „PD“
- die *Identität* für ein sich in Ausführung befindliches Programm
  - das mit einer **Prozessidentifikation** (PID) assoziierte Objekt

Prozessdeskriptor

- Dreh- und Angelpunkt, der alle prozessbezogenen Betriebsmittel bündelt
  - Speicher- und, ggf., Adressraumbelegung †
    ☞ Text-, Daten-, Stapelsegmente (*code, data, stack*)
  - Dateideskriptoren und -köpfe (*inode*) †
    ☞ {Zwischenspeicher,Puffer}deskriptoren, Datenblöcke
  - Datei, die das vom Prozess ausgeführte Programm repräsentiert †
- zentrales Objekt, das Prozess- und Prozessorzustände beschreibt
  - Laufzeitkontext des zugeordneten Programmfadens/Aktivitätsträgers
  - gegenwärtiger Abfertigungszustand (*Scheduling*-Informationen) †
  - anstehende Ereignisse bzw. erwartete Ereignisse †
  - Benutzerzuordnung und -rechte †

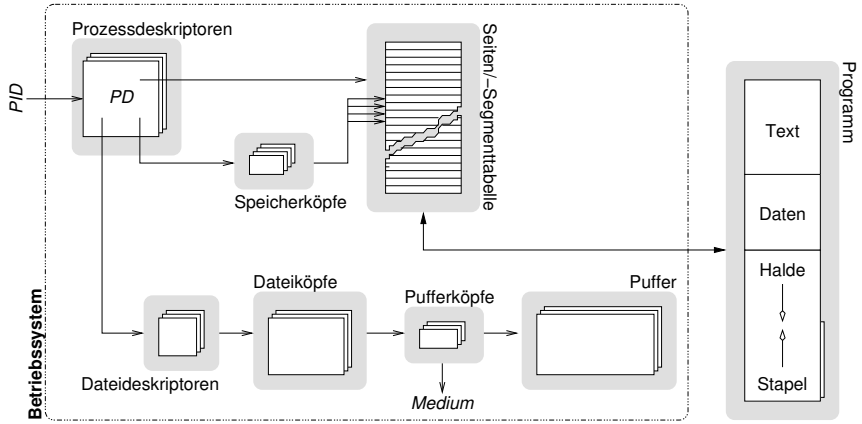
Aspekte der Prozessauslegung

- Aufbau und Struktur des PD ist höchst abhängig von Betriebsart und -zweck:

  † (1) Adressraumdeskriptoren sind nur notwendig im Falle von Systemen, die eine Adressraumisolation erfordern. (2) Für ein Sensor-/Aktorsystem haben Dateideskriptoren/-köpfe wenig Bedeutung. (3) In ROM-basierten Systemen durchlaufen die Prozesse oft immer nur ein und dasselbe Programm. (4) In Einbenutzersystemen ist es wenig sinnvoll, prozessbezogene Benutzerrechte verwalten zu wollen. (5) Bei statischer Ablaufplanung ist die Buchführung von Abfertigungszuständen verzichtbar. (6) Ebenso fällt Ereignisverwaltung nur an bei ereignisgesteuerten und/oder präemptiven Systemen. (7) . . .

- Festlegung auf genau eine Ausprägung grenzt Einsatzgebiete unnötig aus

Generische Datenstruktur „Prozess“



Koroutine — Aktivitätsträger

- ein *autonomer Kontrollfluss* innerhalb eines Programms (z. B. Betriebssystem)

  ☞ **Programm**(kontroll)**faden** (*thread of control*, TOC)

- mit zwei wesentlichen Unterschieden zu herkömmlichen Routinen/Prozeduren:

  1. die Ausführung beginnt immer an der letzten „Unterbrechungsstelle“
     – d. h., an der zuletzt die Kontrolle über den Prozessor abgegeben wurde
     – die Kontrollabgabe geschieht dabei grundsätzlich *kooperativ* (freiwillig)
  2. der Zustand ist *invariant* zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ausführungen

- eine Koroutine kann als „zustandsbehaftete Prozedur“ aufgefasst werden

Koroutine (1)

> An autonomous program which communicates with adjacent modules as if they were input or output subroutines.
>
> [. . .]
>
> Coroutines are subroutines all at the same level, each acting as if it were the master program. [25] [44]

[44] Koroutinen wurden erstmalig um 1963 in der von Conway entwickelten Architektur eines Fließbandübersetzers (*pipeline compiler*) eingesetzt. Darin wurden Parser konzeptionell als Datenflussfließbänder zwischen Koroutinen aufgefasst. Die Koroutinen repräsentierten *first-class* Prozessoren wie z. B. Lexer, Parser und Codegenerator.

Koroutine (2)

- Koroutinen sind Prozeduren ähnlich, es fehlt jedoch die Aufrufhierarchie:

  Beim Verlassen einer Koroutine geht anders als beim Verlassen einer Prozedur die Kontrolle nicht automatisch an die aufrufende Routine zurück. Stattdessen wird mit einer *resume*-Anweisung beim Verlassen einer Koroutine explizit bestimmt, welche andere Koroutine als nächste ausgeführt wird. [26], S. 49

- ein *programmiersprachliches Mittel* zur Prozessorweitergabe an Prozesse

Routinen vs. Koroutinen

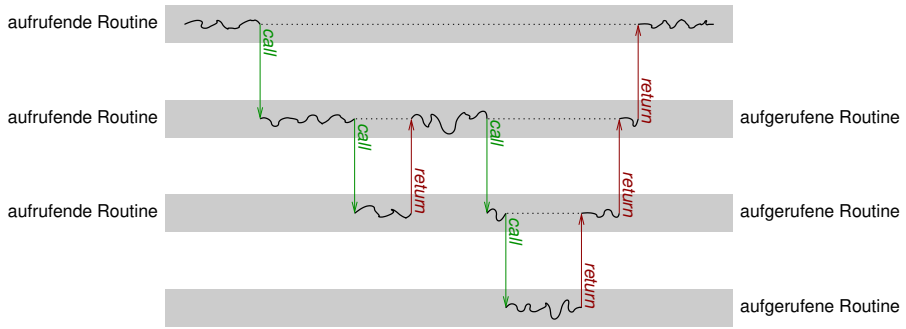
- hinter beiden Konzepten verbergen sich unterschiedliche *Ablaufmodelle*:

  asymmetrische Aktivierung im Falle von Routinen
  - die Beziehung zwischen den Routinen ist *nicht* gleichberechtigt
  - über die Routinen ist eine Aufrufhierarchie definiert

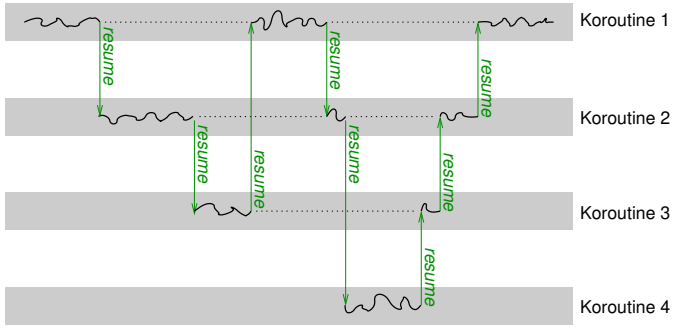
  symmetrische Aktivierung im Falle von Koroutinen
  - die Beziehung zwischen den Koroutinen ist gleichberechtigt
  - über die Koroutinen ist *keine* Aufrufhierarchie definiert

- Routinen werden aufgerufen, um sie zu aktivieren, im Gegensatz zu Koroutinen, die erzeugt, aktiviert und zerstört werden und sich selbst nur deaktivieren

Aufrufhierarchie Routinen



Nebenläufigkeit Koroutinen



Gemeinsamkeiten {Kor,R}outinen

- {Kor,R}outinen sind zu reaktivieren, um weiter ausgeführt werden zu können:

  Routine beim *Rücksprung* aus der aufgerufenen Instanz
  Koroutine beim *Suspendieren* der die Kontrolle abgebenden Instanz

- jeder „Aufruf“ hinterlässt seinen „Fußabdruck“ im *Aktivierungsblock*
  - die Rückkehradresse zur aufrufenden {Kor,R}outine
  - die von der {Kor,R}outine belegten Prozessorregister

- der Aufbau des Aktivierungsblocks ist abhängig vom Prozessor bzw. Kompilierer

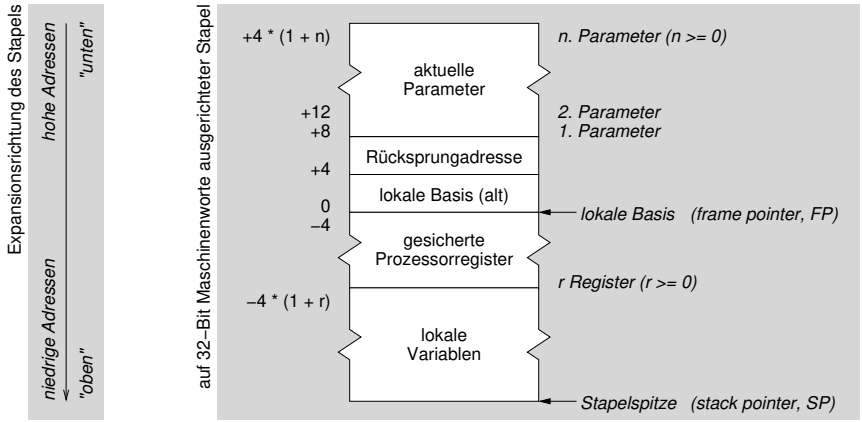
Unterschiede {Kor,R}outinen

eine **Koroutine** besitzt *eigene Betriebsmittel* zur Aktivierungsblockverwaltung

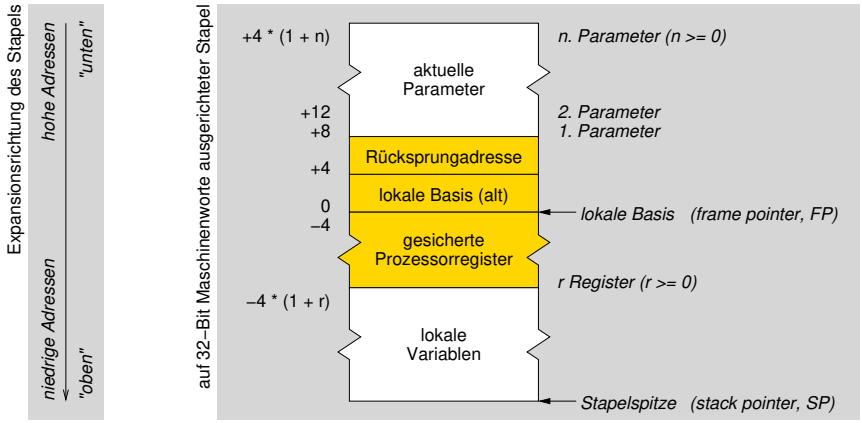
- Art und Anzahl der Betriebsmittel ist sehr problemspezifisch
  - ☞ CPU: CISC (Stapel) vs. RISC (Register und/oder Stapel) Ebene 2
  - ☞ Kompilierer: Laufzeitmodell der Programmiersprache Ebene 5
  - ☞ Anwendungsprogramm: die zu bewältigende Aufgabe Ebene 6
- Verfügbarkeit eigener Betriebsmittel begründet (relative) Unabhängigkeit

eine **Routine** muss sich diese Betriebsmittel mit anderen Routinen teilen

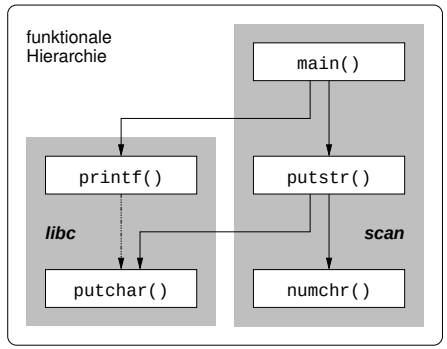
Aktivierungsblock *activation record*



Aktivierungsblock Laufzeitstatus



Stapelverlauf (6-16 – 6-41) Fallstudie (1)



`main()` übergibt (beginnend mit `argv[1]`) die Programmargumente nacheinander an `putstr()` und liefert am Ende eine Statistik über die verarbeiteten Zeichen.

`putstr()` übergibt die Zeichen (des aktuellen Parameters) nacheinander an `numchr()` und `putchar()` und bestimmt die Zeichenlänge (des Programmarguments).

`numchr()` klassifiziert ein Zeichen und bestimmt die Häufigkeit je nach Zeichenkategorie.

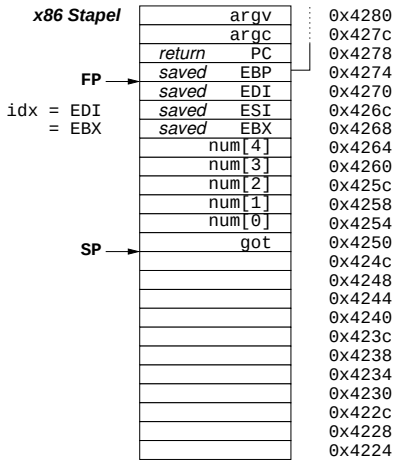
Stapelverlauf

Fallstudie (2)

```
#include <stdio.h>

unsigned numchr (char c, unsigned num[])
{
    if (c < '0') num[0]++;
    else if (c <= '9') num[1]++;
    else if ((c >= 'A') && (c <= 'Z')) num[2]++;
    else if ((c >= 'a') && (c <= 'z')) num[3]++;
    else num[4]++;
    return 1;
}

unsigned putstr (char *str, unsigned num[])
{
    char c;
    unsigned val = 0;
    while ((c = *str++)) {
        val += numchr(c, num);
        putchar(c);
    }
    return val;
}

int main (int argc, char *argv[])
{
    unsigned idx = 0;
    unsigned got = 0;
    unsigned num[5] = {0, 0, 0, 0, 0};

    while (--argc)
        got += putstr(argv[++idx], num);
    printf("\n");

    for (idx = 0; idx < 5; idx++)
        printf("%u ", num[idx]);
    printf("\ntotal %u\n", got);

    return 42;
}
```

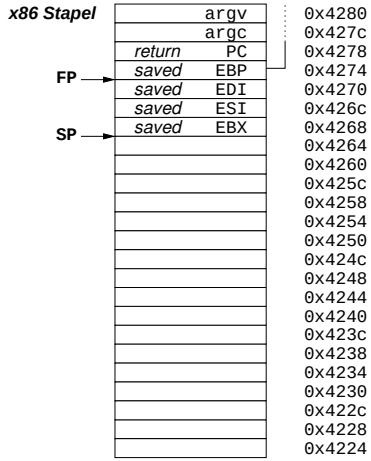

Einrichtung lokaler Variablen (1)

```
int main (int argc, char *argv[])
{
    unsigned idx = 0;
    unsigned got = 0;
    unsigned num[5] = {0, 0, 0, 0, 0};

    while (--argc)
        got += putstr(argv[++idx], num);
    printf("\n");

    for (idx = 0; idx < 5; idx++)
        printf("%u ", num[idx]);
    printf("\ntotal %u\n", got);

    return 42;
}
```



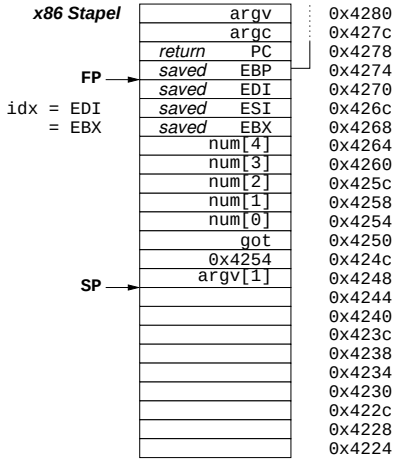
Kontextsicherung (1)

```
int main (int argc, char *argv[])
{
    unsigned idx = 0;
    unsigned got = 0;
    unsigned num[5] = {0, 0, 0, 0, 0};

    while (--argc)
        got += putstr(argv[++idx], num);
    printf("\n");

    for (idx = 0; idx < 5; idx++)
        printf("%u ", num[idx]);
    printf("\ntotal %u\n", got);

    return 42;
}
```



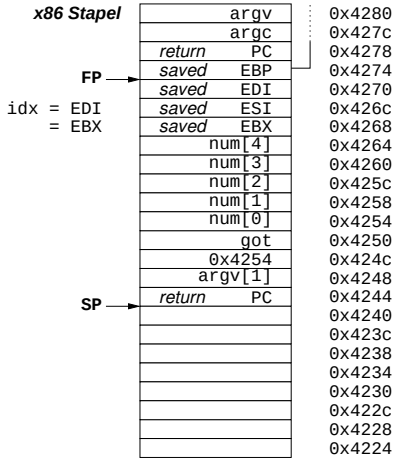
Parameterübergabe (1)

```
int main (int argc, char *argv[])
{
    unsigned idx = 0;
    unsigned got = 0;
    unsigned num[5] = {0, 0, 0, 0, 0};

    while (--argc)
        got += putstr(argv[++idx], num);
    printf("\n");

    for (idx = 0; idx < 5; idx++)
        printf("%u ", num[idx]);
    printf("\ntotal %u\n", got);

    return 42;
}
```



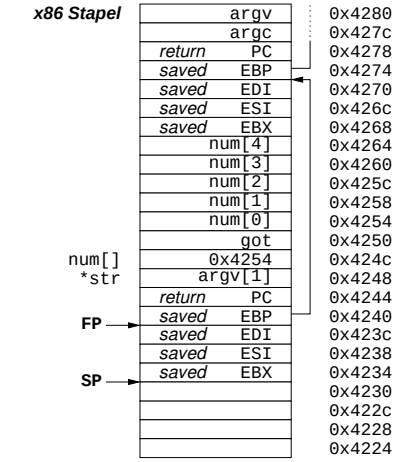
Funktionsaufruf (1)

```
int main (int argc, char *argv[])
{
    unsigned idx = 0;
    unsigned got = 0;
    unsigned num[5] = {0, 0, 0, 0, 0};

    while (--argc)
        got += putstr(argv[++idx], num);
    printf("\n");

    for (idx = 0; idx < 5; idx++)
        printf("%u ", num[idx]);
    printf("\ntotal %u\n", got);

    return 42;
}
```



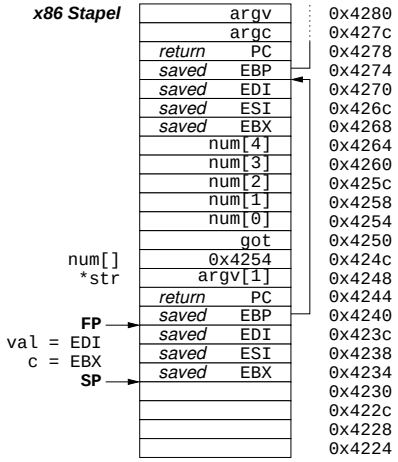
Kontextsicherung (2)

```
unsigned putstr (char *str, unsigned num[])
{
    char c;
    unsigned val = 0;
    while ((c = *str++)) {
        val += numchr(c, num);
        putchar(c);
    }
    return val;
}
```



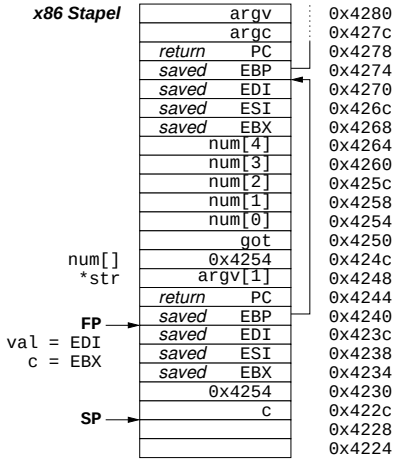
Einrichtung lokaler Variablen (2)

```
unsigned putstr (char *str, unsigned num[])
{
    char c;
    unsigned val = 0;
    while ((c = *str++)) {
        val += numchr(c, num);
        putchar(c);
    }
    return val;
}
```



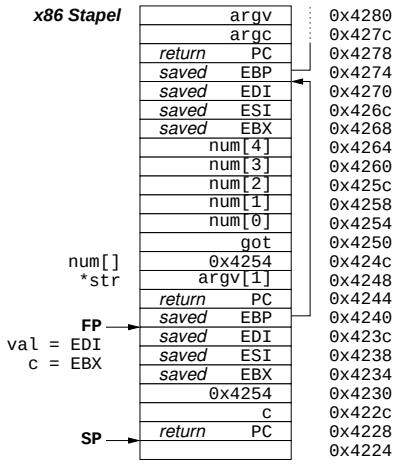
Parameterübergabe (2)

```
unsigned putstr (char *str, unsigned num[])
{
    char c;
    unsigned val = 0;
    while ((c = *str++)) {
        val += numchr(c, num);
        putchar(c);
    }
    return val;
}
```



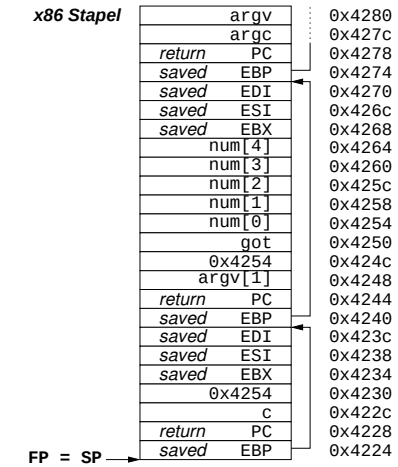
Funktionsaufruf (2)

```
unsigned putstr (char *str, unsigned num[])
{
    char c;
    unsigned val = 0;
    while ((c = *str++)) {
        val += numchr(c, num);
        putchar(c);
    }
    return val;
}
```



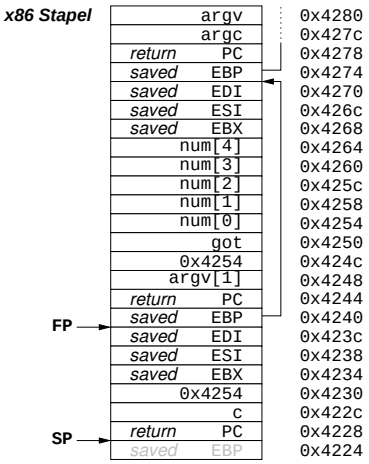
Kontextsicherung (2)

```
unsigned numchr (char c, unsigned num[])
{
    if (c < '0') num[0]++;
    else if (c <= '9') num[1]++;
    else if ((c >= 'A') && (c <= 'Z')) num[2]++;
    else if ((c >= 'a') && (c <= 'z')) num[3]++;
    else num[4]++;
    return 1;
}
```



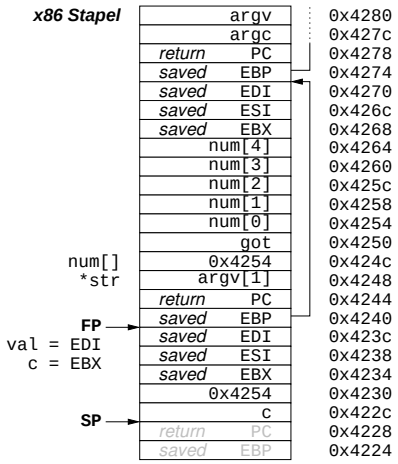
Kontextwiederherstellung (1)

```
unsigned numchr (char c, unsigned num[])
{
    if (c < '0') num[0]++;
    else if (c <= '9') num[1]++;
    else if ((c >= 'A') && (c <= 'Z')) num[2]++;
    else if ((c >= 'a') && (c <= 'z')) num[3]++;
    else num[4]++;
    return 1;
}
```



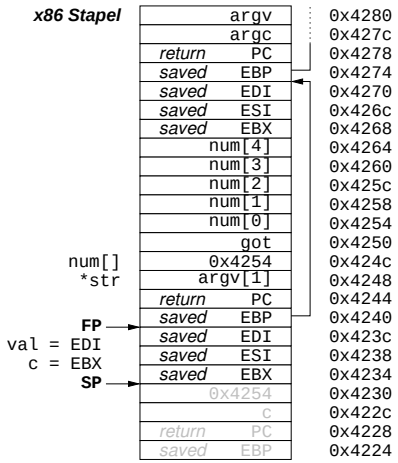
Rücksprung (1)

```
unsigned putstr (char *str, unsigned num[])
{
    char c;
    unsigned val = 0;
    while ((c = *str++)) {
        val += numchr(c, num);
        putchar(c);
    }
    return val;
}
```



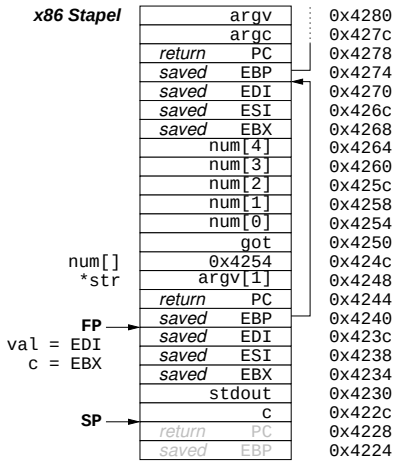
Parameterfreigabe (1)

```
unsigned putstr (char *str, unsigned num[])
{
    char c;
    unsigned val = 0;
    while ((c = *str++)) {
        val += numchr(c, num);
        putchar(c);
    }
    return val;
}
```



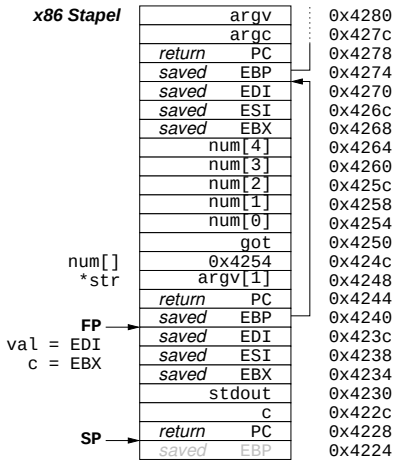
Parameterübergabe (3)

```
unsigned putstr (char *str, unsigned num[])
{
    char c;
    unsigned val = 0;
    while ((c = *str++)) {
        val += numchr(c, num);
        _IO_putc(c, stdout);
    }
    return val;
}
```



Funktionsaufruf (3)

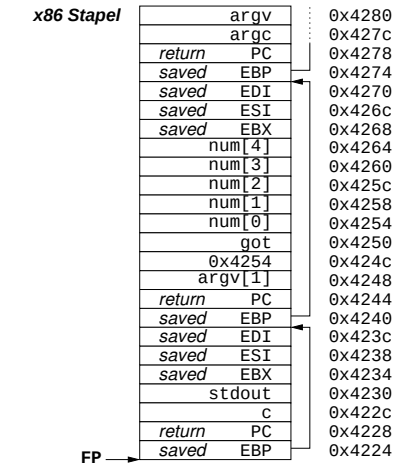
```
unsigned putstr (char *str, unsigned num[])
{
    char c;
    unsigned val = 0;
    while ((c = *str++)) {
        val += numchr(c, num);
        _IO_putc(c, stdout);
    }
    return val;
}
```



C-Bibliothek

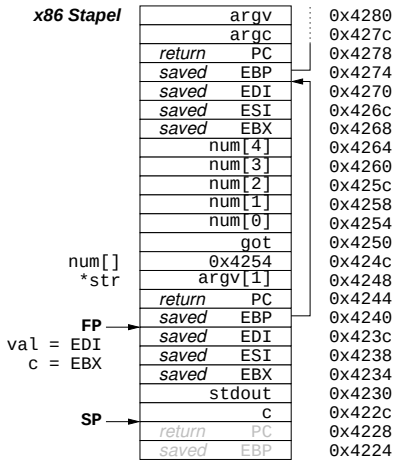
```
int _IO_putc (int c, FILE *stream)
{
    ...
}
```

- `_IO_putc()` gibt das Zeichen (c) aus
  - `stream` identifiziert den Ausgabekanal
  - weiterer Stapelauf- und -abbau
- Kontextwiederherstellung, Rücksprung



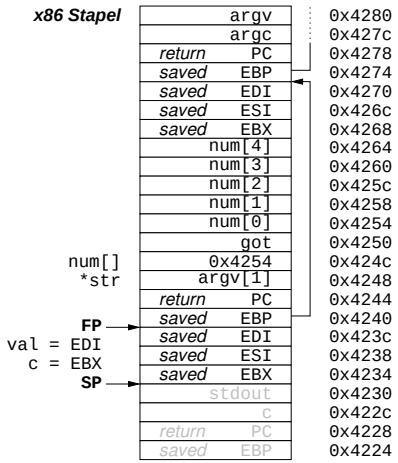
Rücksprung (2)

```
unsigned putstr (char *str, unsigned num[])
{
    char c;
    unsigned val = 0;
    while ((c = *str++)) {
        val += numchr(c, num);
        _IO_putc(c, stdout);
    }
    return val;
}
```



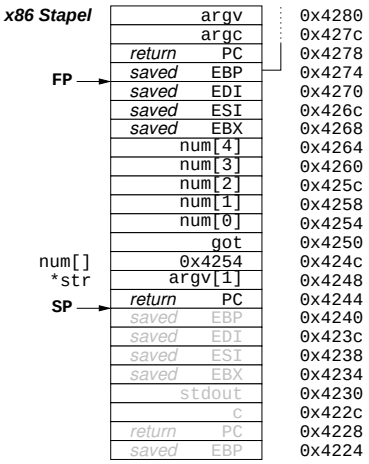
Parameterfreigabe (2)

```
unsigned putstr (char *str, unsigned num[])
{
    char c;
    unsigned val = 0;
    while ((c = *str++)) {
        val += numchr(c, num);
        _IO_putc(c, stdout);
    }
    return val;
}
```



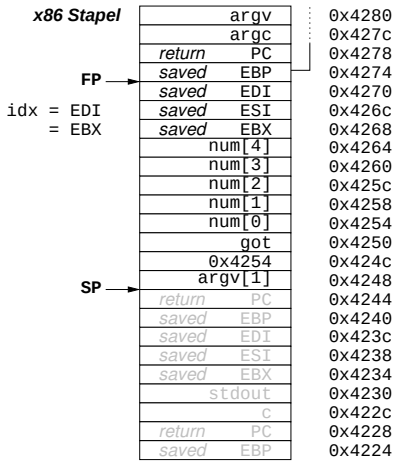
Kontextwiederherstellung (2)

```
unsigned putstr (char *str, unsigned num[])
{
    char c;
    unsigned val = 0;
    while ((c = *str++)) {
        val += numchr(c, num);
        putchar(c);
    }
    return val;
}
```



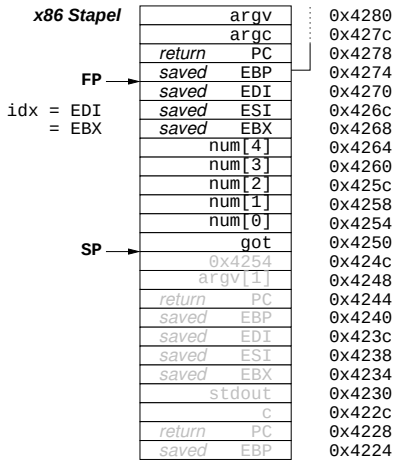
Rücksprung (3)

```
int main (int argc, char *argv[])
{
    unsigned idx = 0;
    unsigned got = 0;
    unsigned num[5] = {0, 0, 0, 0, 0};

    while (--argc)
        got += putstr(argv[++idx], num);
    printf("\n");

    for (idx = 0; idx < 5; idx++)
        printf("%u ", num[idx]);
    printf("\ntotal %u\n", got);

    return 42;
}
```



Parameterfreigabe (3)

```
int main (int argc, char *argv[])
{
    unsigned idx = 0;
    unsigned got = 0;
    unsigned num[5] = {0, 0, 0, 0, 0};

    while (--argc)
        got += putstr(argv[++idx], num);
    printf("\n");

    for (idx = 0; idx < 5; idx++)
        printf("%u ", num[idx]);
    printf("\ntotal %u\n", got);

    return 42;
}
```



Wiederholung und Ausgabe . . .

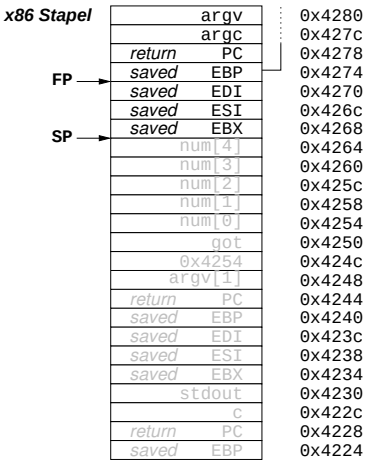
```
int main (int argc, char *argv[])
{
    unsigned idx = 0;
    unsigned got = 0;
    unsigned num[5] = {0, 0, 0, 0, 0};

    while (--argc)
        got += putstr(argv[++idx], num);
    printf("\n");

    for (idx = 0; idx < 5; idx++)
        printf("%u ", num[idx]);
    printf("\ntotal %u\n", got);

    return 42;
}
```

Der bisherige Stapelverlauf (6-20 – 6-37) wird sich in seinen wesentlichen Zügen und für alle weiteren Programmargumente wiederholen. Die Stapelinhalte variieren dabei in Abhängigkeit von den Werten (d. h., den einzelnen Zeichen) der Argumente.

Im weiteren Verlauf wird das Stapelbild durch die abschließenden Ausgaben stark verändert: `printf()` „strapaziert“ den Stapel zutiefst und bewirkt einen entsprechenden Auf- und Abbau.

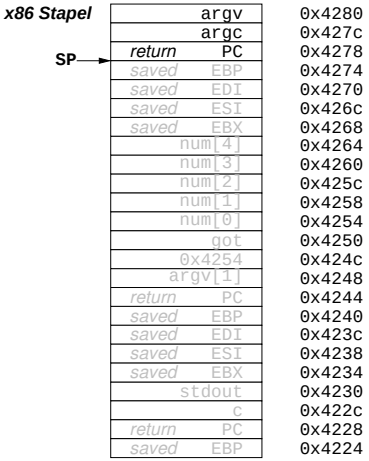
Freigabe lokaler Variablen

```
int main (int argc, char *argv[])
{
    unsigned idx = 0;
    unsigned got = 0;
    unsigned num[5] = {0, 0, 0, 0, 0};

    while (--argc)
        got += putstr(argv[++idx], num);
    printf("\n");

    for (idx = 0; idx < 5; idx++)
        printf("%u ", num[idx]);
    printf("\ntotal %u\n", got);

    return 42;
}
```



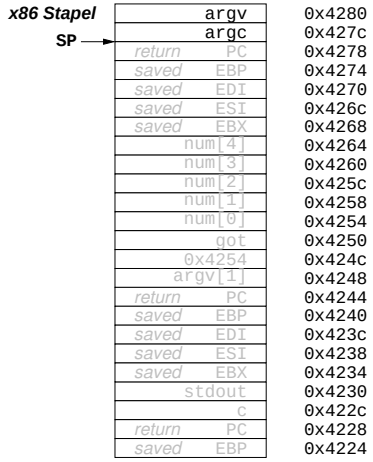
Kontextwiederherstellung (3)

```
int main (int argc, char *argv[])
{
    unsigned idx = 0;
    unsigned got = 0;
    unsigned num[5] = {0, 0, 0, 0, 0};

    while (--argc)
        got += putstr(argv[++idx], num);
    printf("\n");

    for (idx = 0; idx < 5; idx++)
        printf("%u ", num[idx]);
    printf("\ntotal %u\n", got);

    return 42;
}
```



Rücksprung (4) — Schluss . . .

```
int main (int argc, char *argv[])
{
    unsigned idx = 0;
    unsigned got = 0;
    unsigned num[5] = {0, 0, 0, 0, 0};

    while (--argc)
        got += putstr(argv[++idx], num);
    printf("\n");

    for (idx = 0; idx < 5; idx++)
        printf("%u ", num[idx]);
    printf("\ntotal %u\n", got);

    return 42;
}
```



Laufzeitkontext

- der Aktivierungsblock enthält den *Laufzeitstatus* der aufrufenden Routine:
  - die Programmadresse, an der die Routine ihre Ausführung nach erfolgtem Rücksprung weiter fortsetzen wird
    ☞ die Adresse des dem Aufruf nachfolgenden Maschinenbefehls
  - die Inhalte der Arbeitsregister, die von der aufgerufenen Routine im weiteren Verlauf verwendet werden
    ☞ die Inhalte der *nicht-flüchtigen Register*; beim x86: `EBP`, `ESI`, `EDI`, `EBX`
- dieser Status ist *invariant* in Bezug auf die Ausführung aufgerufener Routinen
  - die Anzahl gesicherter nicht-flüchtiger Register ist jedoch variabel
  - abhängig von der aufgerufenen Routine und der virtuellen Maschine

Autonomer Kontrollfluss

- im Gegensatz zur Routine bedeutet die Aktivierung einer Koroutine:
  – Laufzeitstatus-{ *Sicherung* / *Wiederherstellung* } des aktiven eines inaktiven Kontrollflusses
- d. h., Laufzeitstatus-Sicherung/Wiederherstellung verläuft in zwei Dimensionen:

  vertikal bei Einsprung in und Rücksprung aus einer Routine
  ☞ ohne dabei den aktiven Kontrollfluss zu wechseln (6-16 – 6-41)

  horizontal bei Deaktivierung und Aktivierung eines Kontrollflusses
- Koroutinen repräsentieren gleichberechtigte, autonome Kontrollflüsse

Virtuelle Maschine und Laufzeitstatus von Koroutinen

Ebene $_5$ abstrakter Prozessor „Kompilierer“

- der „Prozessor“ unterscheidet zwischen zwei Arten von Registern:
  1. *nicht-flüchtige Register*; invariante Inhalte über Prozedurgrenzen hinweg
  2. *flüchtige Register*; sonst
- die nicht-flüchtigen Register speichern den Laufzeitstatus einer Koroutine
- ein Koroutinenwechsel muss die Inhalte „einiger“ CPU-Register austauschen

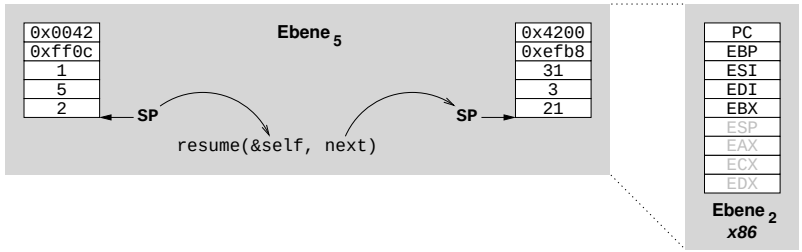
Ebene $_4$ abstrakter Prozessor „Assemblierer“

- alle (Ebene $_2$/CPU) Register speichern den Laufzeitstatus einer Koroutine
- ein Koroutinenwechsel muss die Inhalte „aller“ CPU-Register austauschen

☞ Koroutinenwechsel auf Ebene $_5$ (z. B. in C) sind effizienter als auf Ebene $_4$

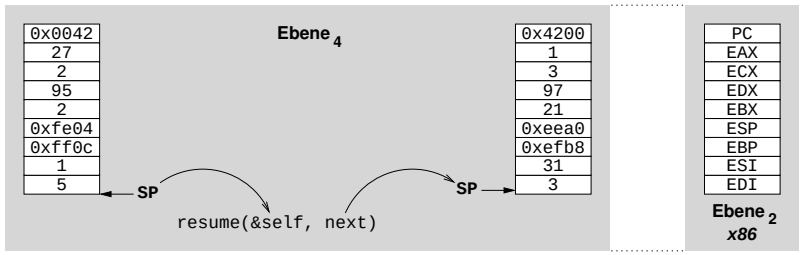
Kontrollflusswechsel (1)

Ebene $_5$ vs. Ebene $_2$



Kontrollflusswechsel (2)

Ebene $_4$ vs. Ebene $_2$



Kontrollflussverwaltung

`next = branch (stkp, argc)` zweigt einen Kontrollfluss ab

- `stkp` ist Stapelzeiger der zu initialisierenden Koroutine
- `argc` ist die Anzahl zusätzlich zu kopierenden Funktionsparameter
- `next` ist Kontextzeiger ($= 0$ ☞ Koroutine, $\neq 0$ ☞ aufrufende Instanz)

`resume (self, next)` setzt einen anderen Kontrollfluss fort

- `self` ist Referenz auf den Kontextzeiger der abgebenden Koroutine
- `next` ist Kontextzeiger der zu aktivierenden Koroutine

`finite (next)` beendet den laufenden Kontrollfluss; aktiviert `next`

Fallstudie: kooperative (zufällige) Ausgabe von `argv[]`

```
#define STACK_SIZE 1024*16

static char *dad;
static char *son;
static int   arg;

int main (int argc, char *argv[]) {
    son = coroutine(argc);
    if (son) {
        while (argc--) {
            resume(&dad, son);
            printf("argv[%d] -> %s\n",
                arg, (int)argv[arg]);
        }
    }
    return 0;
}
```

```
char* coroutine (int argc) {
    char *stk;
    char *foo;
    int run;

    stk = (char*)malloc(STACK_SIZE);
    if (!stk) return 0;

    foo = branch(&stk[STACK_SIZE], 1);
    if (foo) return foo;

    for (run = 1; ; run++) {
        printf("run %d...", run);
        arg = random() % argc;
        resume(&son, dad);
    }
}
```

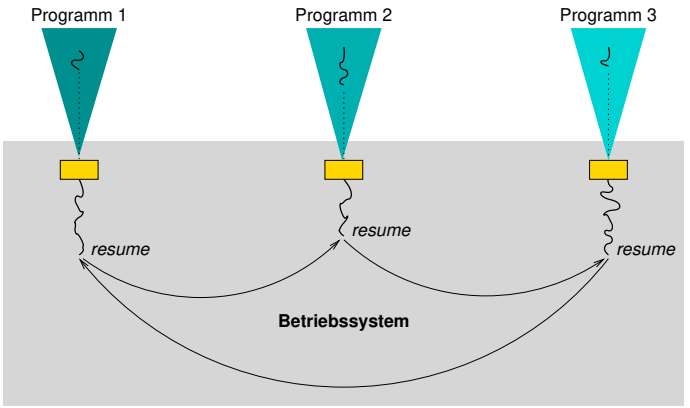
Operationsprinzip von Koroutinen

- die Koroutine „mechanisiert“ den autonomen Kontrollfluss eines Prozesses
  - mit ihr wird die Prozessorzuteilung an ausführbereite Prozesse möglich
  - sie bildet die Grundlage zum Multiplexen der CPU zwischen Prozessen
- das *nicht-sequentielle Operationsprinzip* von Koroutinen ist streng kooperativ
  - eine Koroutine gibt das Betriebsmittel „CPU“ immer nur freiwillig ab
  - die Abgabe ist programmiert, sie muss darüberhinaus erreichbar sein
- Betriebssysteme schützen die CPU vor „unkooperativen Koroutinen“
  - den Koroutinen kann das Betriebsmittel „CPU“ entzogen werden
  - einer Koroutine wird es dadurch unmöglich, die CPU zu monopolisieren

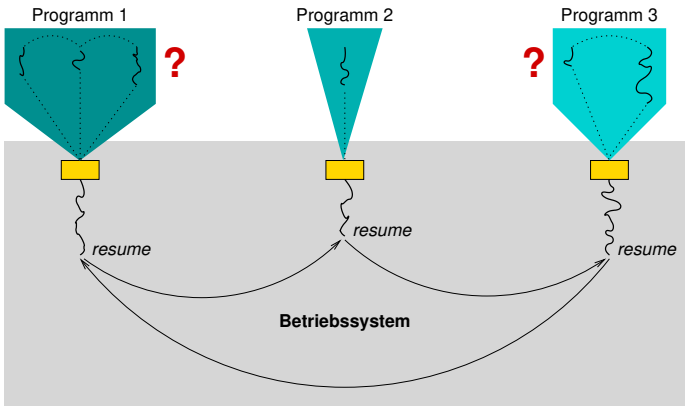
Mehrprogrammbetrieb und Koroutinen

- die Koroutine als „*abstrakter Prozessor*“ zur Ausführung eines Programms:
  - für jedes auszuführende Programm wird genau eine Koroutine bereitgestellt
  - ist eine Koroutine aktiv, läuft auch immer das ihr zugeordnete Programm
  - um ein anderes Programm auszuführen, ist die Koroutine zu wechseln
- die Koroutinen sind als „Aktivitätsträger“ Bestandteil des Betriebssystems
  - für den Laufzeitstatus gibt es pro Koroutine eine *Kontextvariable*
  - jedem Benutzerprogramm ist eine solche Variable zugeordnet
  - die Variablen sind gültig nur innerhalb des Programms „Betriebssystem“
- ein Betriebssystem ist Inbegriff für das *nicht-sequentielle Programm*

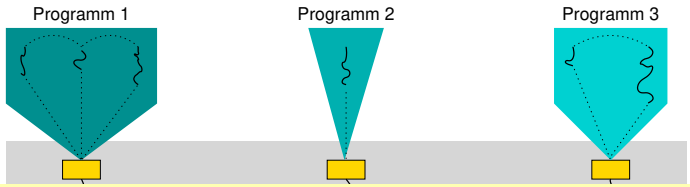
Verarbeitung sequentieller Programme



Verarbeitung (nicht-) sequentieller Programme



Verarbeitung nicht-sequentieller Programme



Programme 1 und 3 sind nicht-sequentielle Programme. Die Verarbeitung aller Kontrollflüsse derartiger Programme durch das Betriebssystem ist nur möglich, wenn im Betriebssystem für jeden Kontrollfluss ein Repräsentant in Form einer Koroutine zur Verfügung steht. Genauso, wie das nicht-sequentielle Programm „Betriebssystem“ seine Kontrollflüsse selbst verwalten muss, wenn die CPU dazu unfähig ist, müssen Programme 1 und 3 ihre Kontrollflüsse selbst verwalten, wenn das Betriebssystem dazu unfähig ist.

Koroutinen ≡ Kooperative

- den Gültigkeitsbereich von Koroutinen legt das sie umgebende Programm fest
  - programmübergreifende Koroutinen { -wechsel lassen sich nicht ausdrücken / -auswahl ist nicht praktizierbar
- die Einplanung (*scheduling*) von Koroutinen ist nicht betriebsmittelorientiert
  - im Vordergrund stehen vielmehr organisatorische/strukturelle Fragen
  - nicht-sequentielle Programme von Koroutinen bilden Kooperativen
  - Koroutinen sind Mittel zum Zweck, Kontrollflüsse zu repräsentieren
- lokale Kooperation ist um „globales Denken und Handeln“ zu ergänzen

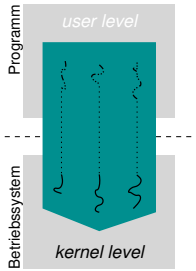
Programmfaden

***thread** of control* **1.** der Faden; der Zusammenhang. **2.** durchziehen.

- Einplanungseinheit („*unit of scheduling*“) für die Vergabe der CPU
  - die Ablaufplanung erfolgt { betriebsmittelorientiert / ereignisgesteuert
- auch bekannt als **leichtgewichtiger Prozess** („*light-weight process*“, LWP)
  - der sich mit anderen Fäden eine gemeinsame Ausführungsumgebung teilt

Entsprechend der Ebene ihres Vorkommens bzw. ihrer Verwaltung werden Fäden in zwei Hauptgruppen unterteilt: Fäden auf Benutzerebene („Benutzerfäden“) und Fäden auf Kernebene („Kernfäden“).

Fäden — Kernebene

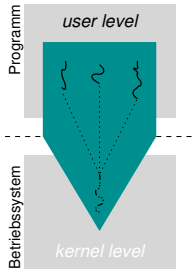


kernel-level thread Prozesskonzept der klassischen Form zur Implementierung nicht-sequentieller Programme

- Prozesse sind Fäden des Programms „Betriebssystem“
- Benutzerfäden werden Kernfäden exklusiv zugeordnet
  - jeder Benutzerfaden besitzt (s)einen Kernfaden
  - nicht jeder Kernfaden „trägt“ einen Benutzerfaden
- Ablaufplanung ist Funktion des Betriebssystem(kern)s

Operationen auf Benutzerfäden sind im Betriebssystemkern implementiert, was zur Konsequenz hat, dass Fadenwechsel innerhalb desselben Benutzerprogramms auch über den Betriebssystemkern verlaufen ☞ Laufzeitaufwand

Fäden — Benutzerebene



user-level thread Prozesskonzept, das Implementierung und Verwaltung von Fäden ganz in „Benutzerhände“ legt

- Prozesse sind mehrfädige (Benutzer-) Programme
- zur Ausführung werden *virtuelle Prozessoren* verwendet
  - die Prozessoren können als Kernfäden realisiert sein
  - der Kern reicht „*scheduler activations*“ nach oben
- Ablaufplanung ist Funktion jedes Benutzerprogramms

Existenz und Anzahl von Benutzerfäden sind dem Betriebssystemkern unbekannt, weshalb über die Auslastung der virtuellen Prozessoren exakte Aussagen nicht getroffen werden können ☞ Prozessorauswahl

Fadenverläufe — Stoßbetrieb (*burst mode*)

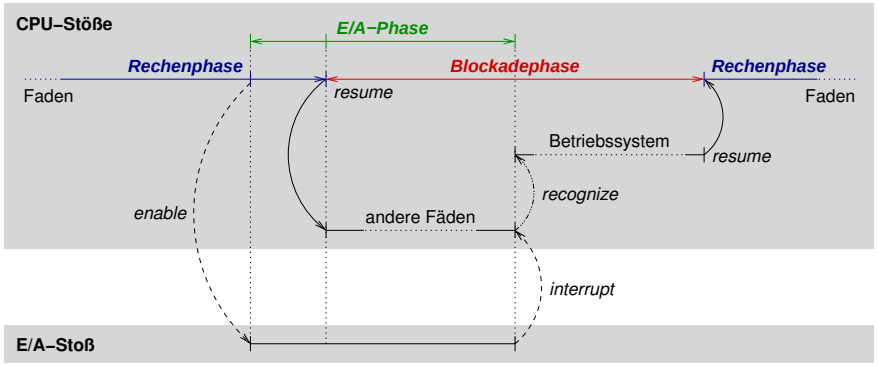
Rechenphase „CPU-Stoß“ (*CPU burst*)

- aktive Phase eines Programmfadens: die CPU führt Instruktionen aus

Blockadephase „E/A-Stoß“ (*I/O burst*)

- inaktive Phase eines Programmfadens, z. B. als Folge von Ein-/Ausgabe:
  - eine E/A-Operation wurde auf Anweisung des Faden in Gang gesetzt
  - der Faden muss die Beendigung der E/A-Operation abwarten
- allgemein: ein Programmfaden erwartet (passiv) ein Ereignis
  - das Ereignis wird von einem anderen Faden signalisiert
  - ein E/A-Gerät kann dabei als „externer Faden“ betrachtet werden

CPU-Stoß vs. E/A-Stoß



Fäden als Mittel zur Leistungsoptimierung

- der CPU-Stoß von Faden$_x$ verläuft parallel[45] zum E/A-Stoß von Faden$_y$
  - ggf. werden CPU- bzw. E/A-Stöße weiterer Fäden zum „Auffüllen“ genutzt
- die Auslastung wird verbessert durch die Überlappung der verschiedenen Stöße
  - in einem Monoprozessorsystem kann immer nur ein CPU-Stoß aktiv sein
  - parallel dazu können jedoch viele E/A-Stöße (anderer Fäden) laufen
  - als Folge sind CPU und E/A-Geräte andauernd mit Arbeit beschäftigt
- bei nur einen Prozessor (CPU, E/A-Gerät) sind die Fäden zu serialisieren

[45] Ein E/A-Stoß ist zu einem Zeitpunkt zwar genau einem Programmfaden zugeordnet, er wird jedoch von einem separaten „*I/O processor*“ (IOP) ausgeführt — dem E/A-Gerät. Dadurch ergibt sich echte Parallelität auf Stoßebene.

Zwangsserialisierung von Programmfäden

- die *absolute Ausführungsdauer* später „eintreffender“ Fäden verlängert sich:
  - Ausgangspunkt seien n Fäden mit gleichlanger Bearbeitungsdauer k
  - der erste Faden wird um die Zeitdauer 0 verzögert
  - der zweite Faden um die Zeitdauer k, der i-te Faden um $(i-1)\cdot k$
  - der letzte von n Fäden wird verzögert um $(n-1)\cdot k$

$$\frac{1}{n}\cdot\sum_{i=1}^{n}(i-1)\cdot k=\frac{n-1}{2}\cdot k$$

- die *mittlere Verzögerung* wächst (subjektiv) proportional mit der Fadenanzahl

Subjektive Empfindung der Fadenverzögerung

- die mittlere Verzögerung eines Fadens ergibt sich zu: $\frac{n-1}{2}\cdot t_{CPU}$
  - mit t_{CPU} gleich der mittleren Dauer eines CPU-Stoßes
  - bei genügend vielen asynchron ablaufenden E/A-Operationen
- zwischen CPU- und E/A-Stößen besteht eine große Zeitdiskrepanz
  - die Verzögerung durch E/A-Operationen ist dominant
  - der proportionale Verzögerungsfaktor bleibt weitestgehend verborgen
  - er greift erst ab einer bestimmten Anzahl von Programmfäden
  - viele Anwendungen/Benutzer nehmen die Verzögerung daher nicht wahr
- die „Totzeit“ bei E/A-Stößen wird für CPU-Stöße laufbereiter Fäden genutzt

Monopolisierung der CPU durch Programmfäden

- mit erfolgter Prozessorzuteilung gewinnen Fäden die Kontrolle über die CPU
  - die CPU führt nur noch Anweisungen aus, die das Benutzerprogramm vorgibt
- das Betriebssystem kann die Kontrolle nur bedingt zurückgewinnen:
  - die Fäden müssten $\left\{\begin{array}{c}\text{synchrone}\\ \text{asynchrone}\end{array}\right\}$ Programmunterbrechungen erfahren
- synchrone Programmunterbrechungen sind ein eher schwaches Instrument
  - die Fäden müssten sich kooperativ dem Betriebssystem gegenüber erweisen
  - „böswillige“ Programme können schnell die Kooperative gefährden/auflösen

Vermeidung eines Ausführungsmonopols — CPU-Schutz

sporadische Unterbrechung bei Beendigung eines E/A-Stoßes −

- der E/A-Stoß musste vorher von einem Faden erst ermöglicht werden
- wann und ob überhaupt ein E/A-Stoß ausgelöst wird ist ungewiss
- ebenso ungewiss ist die E/A-Stoßdauer und damit der Interrupt-Zeitpunkt

periodische Unterbrechung durch Einsatz eines Zeitgebers +

- der Zeitgeber wird je nach Bedarf vom Betriebssystem programmiert
- er sorgt in der Regel für zyklische Unterbrechungen (*timer interrupts*)
- mit Ablauf der vorgegebenen Zeit wird das Betriebssystem reaktiviert

☞ Zugriffe auf Zeitgeber und Interrupt-Maske sind *privilegierte Operationen*!

Einplanung von Programmfäden

Rekapitulation (✗ Kap. 4) . . .

Scheduling stellt sich allgemein zwei grundsätzlichen Fragestellungen:

1. Zu welchem *Zeitpunkt* sollen Prozesse ins System eingespeist werden?
2. In welcher *Reihenfolge* sollen Prozesse ablaufen?

Ein ***Scheduling*-Algorithmus** verfolgt das Ziel, den von einem Rechnersystem zu leistenden Arbeitsplan so aufzustellen (und zu aktualisieren), dass ein gewisses Maß an Benutzerzufriedenheit maximiert wird.

☞ Prozess ≡ Faden

Ebenen der Prozesseinplanung

long-term scheduling kontrolliert den Grad an Mehrprogrammbetrieb [s – min]

- Benutzer Systemzugang gewähren, Programme zur Ausführung zulassen
- Prozesse dem *medium-* bzw. *short-term scheduling* zuführen

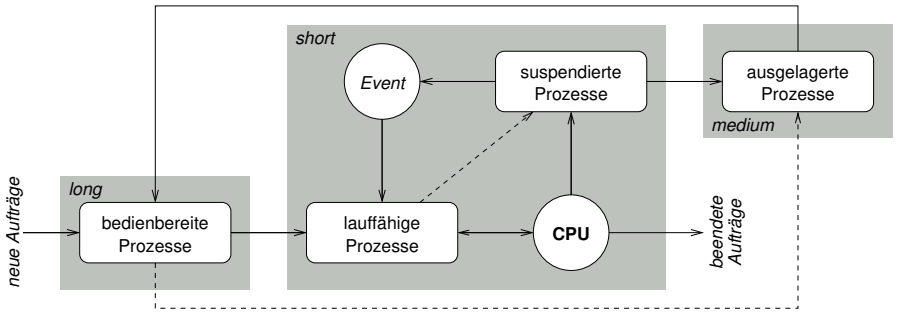
medium-term scheduling als Teil der Ein-/Auslagerungsfunktion [ms – s]

- Programme zwischen Vorder- und Hintergrundspeicher hin- und herbewegen
- *swapping*: auslagern (*swap-out*), einlagern (*swap-in*)

short-term scheduling regelt die Prozessorzuteilung an die Prozesse [μs – ms]

- ereignisgesteuerte Ablaufplanung: Unterbrechungen, Systemaufrufe, Signale
- Blockierung bzw. Verdrängung des laufenden Prozesses

long- vs. *short-* vs. *medium-term scheduling*



Verfahrensweise (1) kooperativ vs. präemptiv

cooperative scheduling voneinander abhängiger Prozesse

- Prozesse müssen die CPU freiwillig abgeben, zugunsten anderer Prozesse
- die Programmausführung muss (direkt/indirekt) Systemaufufe bewirken
- die Systemaufufe müssen (direkt/indirekt) den Scheduler aktivieren

preemptive scheduling voneinander unabhängiger Prozesse

- Prozessen wird die CPU entzogen, zugunsten anderer Prozesse
- der laufende Prozess wird ereignisbedingt von der CPU *verdrängt*[46]
- die Ereignisbehandlung aktiviert (direkt/indirekt) den Scheduler

[46] Beispielsweise als Folge einer Programmunterbrechung, ggf. nur zur Durchsetzung von CPU-Schutz.

Verfahrensweise (2) deterministisch vs. probalisitisch

deterministic scheduling bekannter, exakt vorberechneter Prozesse

- Prozesslaufzeiten/-termine sind bekannt, sie wurden ggf. „*offline*“ berechnet
- die genaue Vorhersage der CPU-Auslastung ist möglich
- das System garantiert die Einhaltung der Prozesslaufzeiten/-termine
- die Zeitgarantien gelten unabhängig von der jeweiligen Systemlast !

probabilistic scheduling unbekannter Prozesse

- Prozesslaufzeiten/-termine bleiben unbestimmt
- die CPU-Auslastung kann lediglich abgeschätzt werden
- das System kann Zeitgarantien weder geben noch einhalten
- Zeitgarantien sind durch Anwendungsmaßnahmen bedingt erreichbar

Verfahrensweise (3) statisch vs. dynamisch

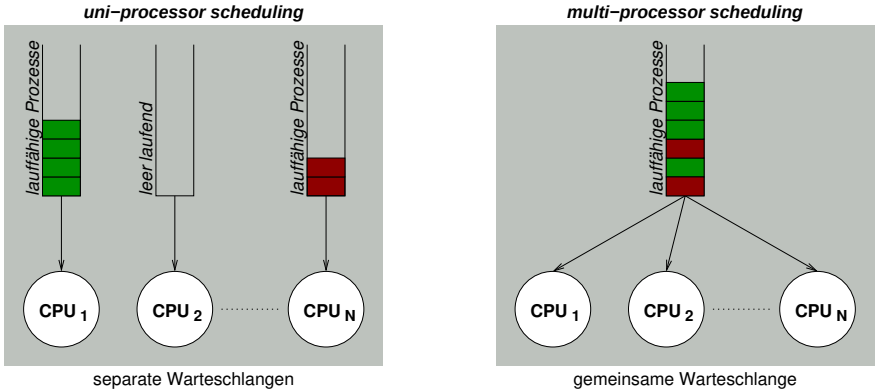
offline scheduling statisch, vor der eigentlichen Programmausführung

- wenn die *Komplexität* eine Ablaufplanung im laufenden Betrieb verbietet
  - Einhaltung aller Zeitvorgaben garantieren: ein NP-vollständiges Problem
  - kritisch, wenn auf jede abfangbare katastrophale Situation zu reagieren ist
- Ergebnis der Vorberechung ist ein vollständiger Ablaufplan (in Tabellenform)
  - (semi-) automatisch erstellt per Quelltextanalyse spezieller „Übersetzer“
  - oft zeitgesteuert abgearbeitet/ausgeführt als Teil der Prozessabfertigung
- die Verfahren sind zumeist beschränkt auf *strikte Echtzeitsysteme*

online scheduling dynamisch, während der eigentlichen Programmausführung

☞ interaktive- und Stapelsysteme, aber auch schwache Echtzeitsysteme

Mehrprozessorsysteme



Dimensionen der Prozesseinplanung

- die Kriterien, nach denen Einplanung betrieben wird, sind unterschiedlich:

  benutzerorientierte Kriterien betrachten die *Benutzerdienlichkeit*
  - d. h. das vom jeweiligen Benutzer wahrgenommene Systemverhalten
  - bestimmen im großen Maße die Akzeptanz des Systems beim Benutzer

  systemorientierte Kriterien betrachten die *Systemperformanz*
  - d. h. die effektive und effiziente Auslastung der Betriebsmittel
  - sind von Bedeutung bei kommerziellen Dienstleistungsanbietern

- die Benutzerdienlicheit ist auch stark durch die Systemperformanz bedingt

Benutzerorientierte Kriterien

Antwortzeit Minimierung der Zeitdauer von der Auslösung eines Systemaufrufs bis zur Entgegennahme der Rückantwort, bei gleichzeitiger Maximierung der Anzahl interaktiver Prozesse.

Durchlaufzeit Minimierung der Zeitdauer vom Starten eines Prozesses bis zu seiner Beendigung, d. h., der effektiven Prozesslaufzeit und aller anfallenden Prozesswartezeiten.

Termineinhaltung Starten und/oder Beendigung eines Prozesses (bis) zu einem fest vorgegebenen Zeitpunkt.

Vorhersagbarkeit Deterministische Ausführung des Prozesses unabhängig von der jeweils vorliegenden Systemlast.

Systemorientierte Kriterien

Durchsatz Maximierung der Anzahl vollendeter Prozesse pro vorgegebener Zeiteinheit. Liefert ein Maß für die geleistete Arbeit im System.

Prozessorauslastung Maximierung des Prozentanteils der Zeit, während der die CPU Prozesse ausführt, d. h., „sinnvolle“ Arbeit leistet.

Gerechtigkeit Gleichbehandlung der auszuführenden Prozesse und Zusicherung, den Prozessen innerhalb gewisser Zeiträume die CPU zuzuteilen.

Dringlichkeiten Bevorzugte Verarbeitung des Prozesses mit der höchsten (statisch/dynamisch zugeordneten) Priorität.

Lastausgleich Gleichmäßige Betriebsmittelauslastung; bevorzugte Verarbeitung der Prozesse, die stark belastete Betriebsmittel eher selten belegen.

Betriebsart vs. Einplanungskriterien

***allgemein*:** Durchsetzung (der Strategie); Gerechtigkeit, Lastausgleich

Stapelbetrieb ☞ Durchsatz, Durchlaufzeit, Prozessorauslastung

interaktiver Betrieb ☞ Antwortzeit; *Proportionalität*:

- Benutzer haben meist eine inhärente Vorstellung über die Dauer bestimmter Aktionen. Dieser (oft auch falschen) Vorstellung sollte das System aus Gründen der Benutzerakzeptanz möglichst entsprechen.

Echtzeitbetrieb ☞ Dringlichkeit, Termineinhaltung, Vorhersagbarkeit

- steht meist im Widerspruch zu Gerechtigkeit und Lastausgleich

Prozessabfertigung — *Dispatching*

- der aktuell laufende Prozess muss dem System „jederzeit“ bekannt sein
  - zur prozessbezogenen *Abrechnung* der Inanspruchnahme von Betriebsmitteln
    ☞ Benutzer-, System- und Stoßzeiten
    ☞ Energiebedarf, Speicherbelegung, Adressraumgröße
    ☞ geöffnete Dateien, genutzte Geräte, . . .
  - zur prozessbezogenen *Überprüfung* der Zugriffsrechte auf Betriebsmittel
- Buch über diesen Prozess führt der „Prozessabfertiger“ (*process dispatcher*)
  - ausgedrückt als „Zeiger“ auf den PD des aktuell laufenden Prozesses
  - ein Fadenwechsel hat die Aktualisierung dieses Zeigers zur Konsequenz
- den Zeigerwert liefert eine je nach Systemkonzept variierende Funktion

Aktueller Faden

`pd = racer()`

`task` globale Variable, die mit jedem Fadenwechsel explizit zu setzen ist; der Fadenstapel ist Variable des Betriebssystems

`u.task` Attribut einer Datenstruktur `u`, die mit jedem Fadenwechsel in den Betriebssystemadressraum einzublenden ist; `u` enthält den Fadenstapel

`sp & -STACK_SIZE` „lokale Variable“ am Ende eines Fadenstapels, der mit jedem Fadenwechsel in den Betriebssystemadressraum einzublenden ist

`(sp | (STACK_SIZE - 1)) - (sizeof(PD) - 1)` „aktueller Parameter“ am Anfang eines als Betriebssystemvariable ausgelegten Fadenstapels

Einplanung $\Longleftrightarrow$ Abfertigung

process scheduler trifft strategische Entscheidungen

- betrachtet wird immer eine Menge lauffähiger Prozesse
  - die PDs der betreffenden Prozess sind in einer Warteschlange aufgereiht
  - welche Position darin ein PD einnimmt, obliegt der Einplanungsstrategie
- der aktuell laufende Prozess ist immer von der Entscheidung mit betroffen
  - dazu muss der PD des laufenden Prozesses „jederzeit greifbar“ sein
  - bei der Prozesabfertigung wird entsprechend Buch über diesen PD geführt

process dispatcher setzt die Entscheidungen durch

- schaltet um zum jeweils ausgewählten Prozess und vermerkt seinen PD

Race Condition „Verdrängung“

- verdrängende Ablaufplanung ist „Querschnittsbelang“ eines ganzen Systems:

  Abfertigung muss atomar erfolgen; nur ein Ansatz, bei dem ein Umsetzen des Stapelzeigers gleichzeitig ein Umsetzen des PD-Zeigers bedeutet, verläuft implizit koordiniert. ☞ PD ist „aktueller Parameter“

  Einplanung muss atomar erfolgen; Operationen auf die zur Implementierung der Warteschlange(n) verwendeten dynamischen Datenstrukturen sind zu koordinieren.

  Anwendung muss ggf. atomar erfolgen; mehrfädige Programme bzw. einfädige Programme, die sich mit anderen Programmen *gemeinsame Variablen* teilen, sind zu koordinieren.

- unterlassene, schlechte oder falsche Koordinierung verursacht „Albträume“

Zusammenfassung

- eine Prozessinkarnation ist ein *Programmfaden* des Betriebssystems
  - Programmfäden (*threads*) sind eine spezialisierte Form von Koroutinen
  - Koroutine ☞ autonomer Kontrollfluss mit kooperativem Operationsprinzip
- zwei Fadenarten kommen vor: *kernel-level threads* vs. *user-level threads*
  - beide Ausprägungsformen von Fäden können gleichzeitig vorhanden sein
  - Kernfaden ☞ ggf. ein abstrakter Prozessor für Benutzerfäden
- Fadenverläufe schreiten stoßweise voran: CPU-Stoß vs. E/A-Stoß
  - E/A-Stöße wartender Fäden kommen CPU-Stößen lauffähiger Fäden zugute
  - die Einplanungs- und Abfertigungsverfahren sind ggf. zu koordinieren