

# Systemprogrammierung

## Rechnerorganisation: Maschinenprogramme

Wolfgang Schröder-Preikschat, Jürgen Kleinöder

Lehrstuhl Informatik 4

Ergänzende Materialien

## Konventionelle **hybride Schicht** in einem Rechensystem

Maschinenprogramme enthalten zwei Sorten von Elementaroperationen:

- ❶ **Maschinenbefehle** der Befehlssatzebene (ISA)
  - normalerweise direkt interpretiert durch die Zentraleinheit (Ebene<sub>2</sub>)
  - ausnahmsweise partiell interpretiert vom Betriebssystem (Ebene<sub>3</sub>)
- ❷ **Systemaufrufe** an das Betriebssystem
  - das normalerweise nur noch Elementaroperationen der ISA enthält

### Hybrid: „etwas Gebündeltes, Gekreuztes oder Gemischtes“ [2]

- ein System, in dem zwei Techniken miteinander kombiniert werden:
  - ❶ Interpretation von Programmen der Befehlssatzebene
  - ❷ partielle Interpretation von Maschinenprogrammen
- ein Maschinenprogramm ist **Hybridsoftware**, die auf Ebene<sub>2,3</sub> läuft

## Gliederung

- ❶ **Vorwort**
  - Hybrid
- ❷ **Programmhierarchie**
  - Hochsprachenkonstrukte
  - Assemblersprachenanweisungen
  - Betriebssystembefehle
- ❸ **Organisationsprinzipien**
  - Funktionen
  - Komponenten
- ❹ **Zusammenfassung**

## Betriebssystem $\equiv$ Programm der Befehlssatzebene

- ein Betriebssystem implementiert die Maschinenprogrammebene
  - es zählt damit selbst nicht zur Klasse der Maschinenprogramme
  - es setzt normalerweise keine Systemaufrufe (an sich selbst) ab
  - es interpretiert eigentümliche Programme nur eingeschränkt partiell

### Teilinterpretation von Betriebssystemprogrammen

- bewirkt **indirekt rekursive Programmausführungen** im Betriebssystem
- erfordert die Fähigkeit zum **Wiedereintritt** (engl. *re-entrance*)<sup>a</sup>
- ab einer bestimmten Ebene im Betriebssystem ist dies unzulässig

<sup>a</sup>Beachte: Teilinterpretation wird durch eine Programmunterbrechung ausgelöst.

- gleichwohl sollten Betriebssysteme es zulassen, in der Ausführung eigentümlicher Programme unterbrochen werden zu können
  - nicht durch Systemaufrufe aber durch *Traps* oder *Interrupts*. . .

## Gliederung

### 1 Vorwort

- Hybrid

### 2 Programmhierarchie

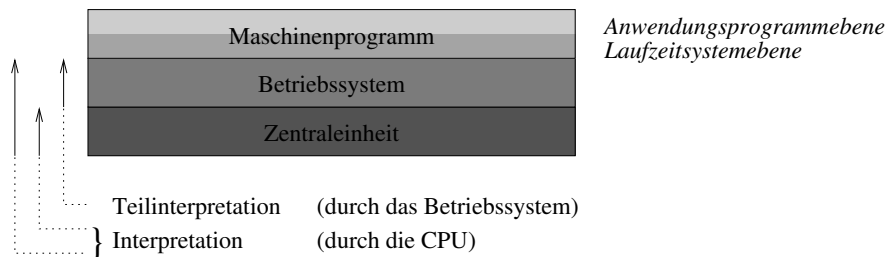
- Hochsprachenkonstrukte
- Assemblersprachenanweisungen
- Betriebssystembefehle

### 3 Organisationsprinzipien

- Funktionen
- Komponenten

### 4 Zusammenfassung

## „Triumvirat“ zur Ausführung von Anwendungsprogrammen



- Maschinenprogramm = Anwendungsprogramm + Laufzeitsystem
  - beide Ebenen teilen sich denselben Programmadressraum
  - normale Unterprogrammaufrufe aktivieren das Laufzeitsystem
- Ausführungsplattform = Betriebssystem + Zentraleinheit (CPU)
  - zwischen den Ebenen erstreckt sich die Hard-/Softwaregrenze
  - Systemaufrufe (engl. *system calls*) aktivieren das Betriebssystem

## Maschinensprache(n)

Maschinenprogramme setzen sich aus Anweisungen zusammen, die **ohne Übersetzung** von einem Prozessor ausführbar sind

- gleichwohl werden sie (normalerweise) durch Übersetzung generiert
  - nahezu ausschließlich automatisch: Kompilierer, Assembler, Binder
  - in seltenen Fällen manuell: **natürlicher Kode** (engl. *native code*)<sup>1</sup>
- sie repräsentieren sich technisch als **Lademodul** (engl. *load module*)
  - erzeugt durch Dienstprogramme (engl. *utilities*): `gcc(1)`, `as(2)`, `ld(1)`
  - besorgt, verarbeitet und entsorgt durch Betriebssysteme

Grundlage für die Entwicklung von Maschinenprogrammen bilden Hoch- und (vereinzelt) Assemblersprachen — und zwar auf:

- 1 Anwendungsprogrammebene
- 2 Laufzeitsystemebene
- 3 Betriebssystemebene

<sup>1</sup>Binärkode des realen Prozessors, auch: Maschinencode.

## Anwendungsprogrammebene: C

Maschinenprogramm realisiert mit Ebene<sub>5</sub>-Konzepten:

```
echo.c
void echo () {
    char c;
    while (write(1, &c, read(0, &c, 1)) != -1) {}
}
```

Funktion `read(2)` überträgt ein Zeichen von Standardeingabe (0) an die Arbeitsspeicheradresse `&c`, deren Inhalt anschließend mit der Funktion `write(2)` zur Standardausgabe (1) gesendet wird. Die Schleife terminiert durch Unterbrechung, unter UNIX z.B. nach Eingabe von `^C`.

## Anwendungsprogrammebene: ASM

Maschinenprogramm realisiert mit Ebene<sub>4</sub>-Konzepten:

- gcc -O6 -fomit-frame-pointer -S echo.c

echo () {...

```
echo:
    pushl %ebx
    subl $40,%esp
    leal 39(%esp),%ebx
    .p2align 4,,7
    .p2align 3
```

while (...) {}

```
.L2:
    movl $1,8(%esp)
    movl %ebx,4(%esp)
    movl $0,(%esp)
    call read
    movl %ebx,4(%esp)
    movl $1,(%esp)
    movl %eax,8(%esp)
    call write
    addl $1,%eax
    jne .L2
```

...}

```
    addl $40,%esp
    popl %ebx
    ret
```

un aufgelöste Referenzen der Systemfunktionen read(2) und write(2)

- werden vom Binder ld(1) aufgelöst → libc.a

## Betriebssystemebene: ASM

Programm der Befehlssatzebene realisiert mit Ebene<sub>4</sub>-Konzepten:

- kernel-source-2.4.20/arch/i386/kernel/entry.S (Auszug)

Sichern

```
system_call:
    pushl %eax
    cld
    pushl %es
    pushl %ds
    pushl %eax
    pushl %ebp
    pushl %edi
    pushl %esi
    pushl %edx
    pushl %ecx
    pushl %ebx
    ...
```

Interpretieren

```
...
    cmpl $(NR_syscalls),%eax
    jae badsys
    call *sys_call_table(,%eax,4)
    movl %eax,24(%esp)
ret_from_sys_call:
    ...
badsys:
    movl $-ENOSYS,24(%esp)
    jmp ret_from_sys_call
```

Wiederherstellen

```
...
    popl %ebx
    popl %ecx
    popl %edx
    popl %esi
    popl %edi
    popl %ebp
    popl %eax
    popl %ds
    popl %es
    addl $4,%esp
    iret
```

Systemaufrufzuteiler (engl. *system call dispatcher*): ASM ein Muss...

## Laufzeitsystemebene: ASM

Maschinenprogramm realisiert mit Ebene<sub>4</sub>-Konzepten:

- 1 gcc -O6 -fomit-frame-pointer -static echo.c
- 2 Verwendung der disassemble-Operation von gdb(1)

read:

```
push %ebx
movl 16(%esp),%edx
movl 12(%esp),%ecx
movl 8(%esp),%ebx
mov $3,%eax
int $0x80
pop %ebx
cmp $-4095,%eax
jae __syscall_error
ret
```

\_\_syscall\_error:

```
neg %eax
mov %eax,errno
mov $-1,%eax
ret

.comm errno,16
```

write:

```
push %ebx
movl 16(%esp),%edx
movl 12(%esp),%ecx
movl 8(%esp),%ebx
mov $4,%eax
int $0x80
pop %ebx
cmp $-4095,%eax
jae __syscall_error
ret
```

Systemaufruf durch **synchrone Programmunterbrechung** **int \$0x80**

- explizit die Teilinterpretation des Maschinenprogramms anfordern

## Betriebssystemebene: Systemaufrufe verarbeiten

Betriebssysteme realisieren einen **Befehlsabruf- und -ausführungszyklus** (engl. *fetch-execute cycle*)<sup>2</sup> zur Ausführung von Systemaufrufen

- 1 Prozessorstatus des unterbrochenen Programms sichern
  - Aufforderung der CPU zur Teilinterpretation nachkommen
- 2 Systemaufruf interpretieren (Maschinenprogramm teilinterpretieren):
  - (i) Systemaufrufnummer (Operationskode) abrufen
  - (ii) auf Gültigkeit überprüfen und ggf. Fehlerbehandlung auslösen
  - (iii) bei gültigem Operationskode, zugeordnete Systemfunktion ausführen
- 3 Prozessorstatus wiederherstellen und zurückspringen
  - Beendigung der Teilinterpretation der CPU „mitteilen“

### Notwendigkeit zur Assemblersprache

- Teilinterpretation erfordert kompletten Zugriff auf den CPU-Status
- dieser ist nicht mehr Teil des Programmiermodells einer Hochsprache

<sup>2</sup>Wiederkehrende gleichartige, ähnliche oder vergleichbare Ereignisse oder Prozesse.

## Betriebssystemebene: C

Programm der Befehlssatzebene realisiert mit Ebene<sub>5</sub>-Konzepten:

- kernel-source-2.4.20/fs/read\_write.c (Auszug)

```
asmlinkage ssize_t sys_read(unsigned int fd, char *buf, size_t count) {
    ssize_t ret;
    struct file *file;

    ret = -EBADF;
    file = fget(fd);
    if (file) {
        ...
    }
    return ret;
}

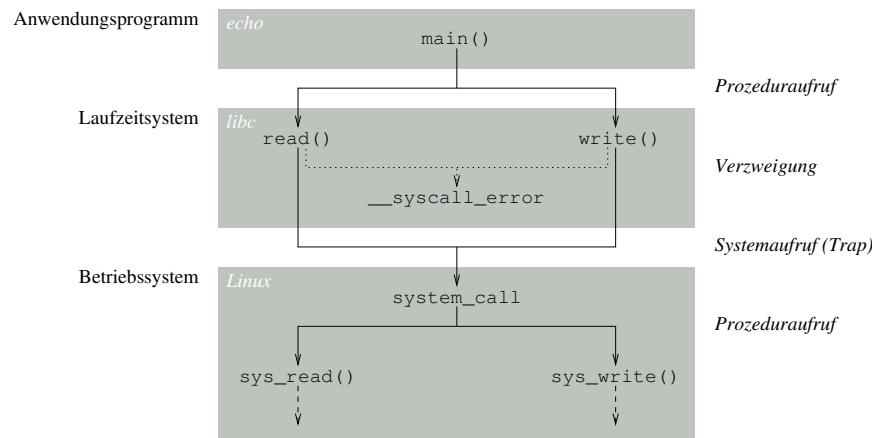
asmlinkage ssize_t sys_write ...
```

**Systemfunktion** (Implementierung) innerhalb des Betriebssystems

- aktiviert durch `call *sys_call_table(,%eax,4)` (S. 11)

## Zusammenspiel der Ebenen des „echo“-Anwendungsfalls

Aufrufhierarchie



## Gliederung

- 1 Vorwort
  - Hybrid
- 2 Programmhierarchie
  - Hochsprachenkonstrukte
  - Assemblersprachenanweisungen
  - Betriebssystembefehle
- 3 Organisationsprinzipien
  - Funktionen
  - Komponenten
- 4 Zusammenfassung

## Systemaufrufsschnittstelle (engl. *system call interface*)

UNIX Programmers Manual (UPM), Lektion 2 — `man(2)`

```
read:
    push %ebx
    movl 16(%esp),%edx
    movl 12(%esp),%ecx
    movl 8(%esp),%ebx
    mov $3,%eax
    int $0x80
    pop %ebx
    cmp $-4095,%eax
    jae __syscall_error
    ret
```

**Aufrufstümpfe** verbergen die technische Auslegung der Interaktion zwischen Anwendungsprogramm und BS

- „nach außen“ erscheint ein Systemaufruf als normaler **Prozeduraufruf**
- „nach innen“ setzt ein Systemaufruf eine (synchrone) **Programmunterbrechung** ab

Systemaufrufe sind spezielle „**Prozedurfernaufrufe**“, die ggf. bestehende Schutzdomänen in kontrollierter Weise überwinden müssen

- getrennte Adressräume für Anwendungsprogramm und BS
- Ein-/Ausgabeparameter in Registern übergeben, „Trap“ auslösen

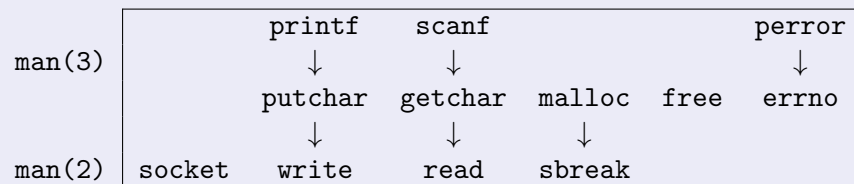
## Laufzeitumgebung (engl. *runtime environment*)

UNIX *Programmers Manual* (UPM), Lektion 3 — `man(3)`

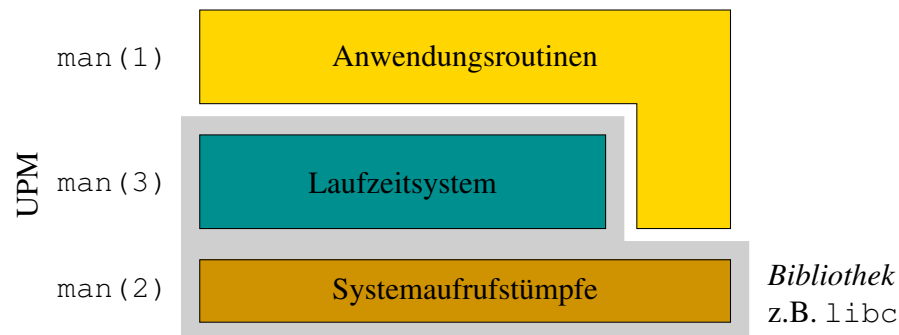
**Programmbausteine** in Form eines zur Laufzeit zur Verfügung gestellten universellen Satzes von Funktionen und Variablen

- Lesen/Schreiben von Dateien, Ein-/Ausgabegeräte steuern
- Daten über Netzwerke transportieren oder verwalten
- formatierte Ein-/Ausgabe, ...

### Laufzeitbibliothek von C unter UNIX (Auszug)



## Grobstruktur von Maschinenprogrammen



### Statisch gebundenes Programm

- zum Ladezeitpunkt des Programms sind alle Referenzen aufgelöst
  - Compiler und Assembler lösen lokale (interne) Referenzen auf
  - der Binder löst globale (`extern`, `.globl`) Referenzen auf
- Schalter `-static` bei `gcc(1)` oder `ld(1)`

## Ensemble problemspezifischer Prozeduren

### Anwendungsroutinen (des Rechners)

- bei C/C++ die Funktion `main()` und anderes Selbstgebautes
- setzen u.a. Betriebssystem- oder Laufzeitsystemaufrufe ab

### Laufzeitsystemfunktionen (des Compilers/Betriebssystems)

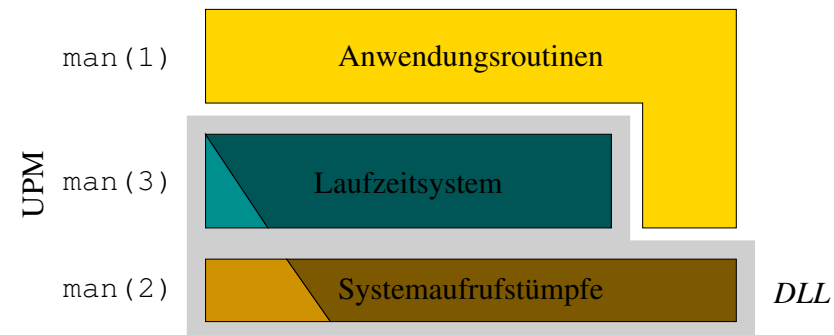
- bei C z.B. die Bibliotheksfunktionen `printf(3)` und `malloc(3)`
- setzt Betriebssystem- oder (andere) Laufzeitsystemaufrufe ab

### Systemaufrufstümpfe (des Betriebssystems)

- bei UNIX z.B. die Bibliotheksfunktionen `read(2)` und `write(2)`
- setzen Aufrufe an das Betriebssystem ab
  - Systemaufruf  $\mapsto$  synchrone Programmunterbrechung  $\sim$  *Trap*

- bilden zusammengebunden das **Maschinenprogramm** (Lademodul)

## Grobstruktur von Maschinenprogrammen (Forts.)



### Dynamisch gebundenes Programm

- Bibliotheksfunktionen erst bei Bedarf (vom Betriebssystem) einbinden
  - zur Laufzeit, bei erstmaligem Aufruf („*trap on use*“, `Multics[1]`)
  - **bindender Lader** (engl. *linking loader*) im Betriebssystem
- dynamische Bibliothek (*shared library*, *dynamic link library* (DLL))

## Gliederung

- 1 Vorwort
  - Hybrid
- 2 Programmhierarchie
  - Hochsprachenkonstrukte
  - Assemblersprachenanweisungen
  - Betriebssystembefehle
- 3 Organisationsprinzipien
  - Funktionen
  - Komponenten
- 4 Zusammenfassung

## Literaturverzeichnis

- [1] ORGANICK, E. I.:  
*The Multics System: An Examination of its Structure.*  
 MIT Press, 1972. –  
 ISBN 0-262-15012-3
- [2] <http://de.wikipedia.org/wiki/Hybrid>

## Resümee

- Maschinenprogramme umfassen zwei Arten Elementaroperationen
  - (1) Maschinenbefehle der Befehlssatzebene und (2) Systemaufrufe
  - Befehle, die ohne Übersetzung von einem Prozessor ausführbar sind
- typisches Programm der Befehlssatzebene ist ein Betriebssystem
  - das einen abstrakten Prozessor (Ebene<sub>3</sub>) implementiert
  - das einen Befehlsabruf- und -ausführungszyklus realisiert
- Teilinterpretation ist nicht strikt auf Maschinenprogramme bezogen
  - ein Betriebssystem kann eigentümliche Programme teilinterpretieren
    - wenn diese etwa durch *Traps* oder *Interrupts* unterbrochen wurden
  - dazu muss das Betriebssystem allgemein zum Wiedereintritt fähig sein
- Maschinenprogramme als Ensemble problemspezifischer Routinen
  - Anwendungsroutinen, Laufzeitsystemfunktionen, Systemaufrufstümpfe
  - statisch/dynamisch zusammengebunden als Lademodul repräsentiert