

## Gliederung

# Systemprogrammierung

## Rechnerorganisation: Maschinenprogramme

Wolfgang Schröder-Preikschat, Jürgen Kleinöder

Lehrstuhl Informatik 4

Ergänzende Materialien

### 1 Vorwort

- Hybrid

### 2 Programmhierarchie

- Hochsprachenkonstrukte
- Assembliersprachenanweisungen
- Betriebssystembefehle

### 3 Organisationsprinzipien

- Funktionen
- Komponenten

### 4 Zusammenfassung

## Konventionelle hybride Schicht in einem Rechensystem

Maschinenprogramme enthalten zwei Sorten von Elementaroperationen:

- ① **Maschinenbefehle** der Befehlssatzebene (ISA)
  - normalerweise direkt interpretiert durch die Zentraleinheit (Ebene 2)
  - ausnahmsweise partiell interpretiert vom Betriebssystem (Ebene 3)
- ② **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:
  - ① Interpretation von Programmen der Befehlssatzebene
  - ② partielle Interpretation von Maschinenprogrammen
- ein Maschinenprogramm ist **Hybridsoftware**, die auf Ebene 2,3 läuft

## 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

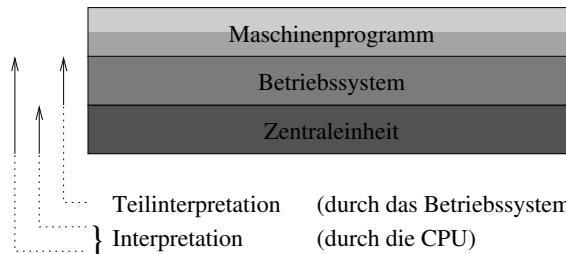
- Hochsprachenkonstrukte
- Assembliersprachenanweisungen
- Betriebssystembefehle

### 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 Code** (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 Anwendungsprogramm ebene
- 2 Laufzeitsystem ebene
- 3 Betriebssystem ebene

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

## Anwendungsprogramm ebene: C

Maschinenprogramm realisiert mit Ebene 5-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 4-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
```

unaufgelöste Referenzen der Systemfunktionen `read(2)` und `write(2)`

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

## Betriebssystemebene: ASM

Programm der Befehlssatzebene realisiert mit Ebene 4-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 4-Konzepten:

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

```
read:
```

```
    pushl %ebx  
    movl 16(%esp),%edx  
    movl 12(%esp),%ecx  
    movl 8(%esp),%ebx  
    movl $3,%eax  
    int $0x80  
    popl %ebx  
    cmpl $-4095,%eax  
    jae __syscall_error  
    ret
```

```
__syscall_error:
```

```
    negl %eax  
    movl %eax,errno  
    movl $-1,%eax  
    ret  
  
.comm errno,16
```

```
write:
```

```
    pushl %ebx  
    movl 16(%esp),%edx  
    movl 12(%esp),%ecx  
    movl 8(%esp),%ebx  
    movl $4,%eax  
    int $0x80  
    popl %ebx  
    cmpl $-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 Assembliersprache

- 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 5-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)

## Gliederung

### 1 Vorwort

- Hybrid

### 2 Programmhierarchie

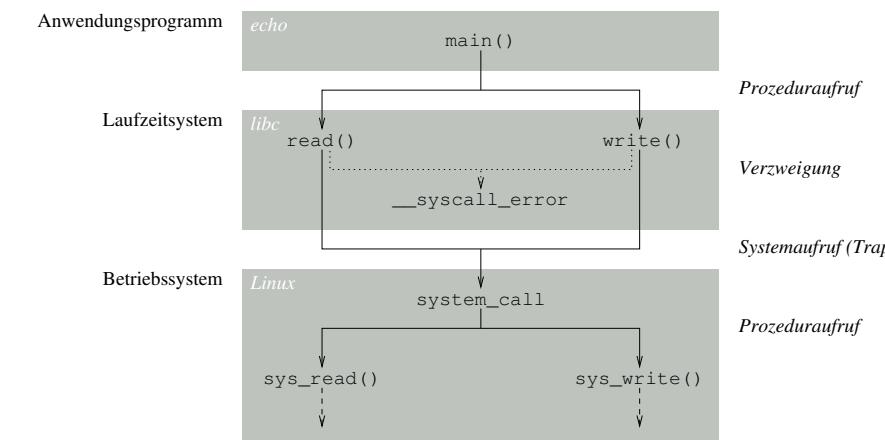
- Hochsprachenkonstrukte
- Assembliersprachenanweisungen
- Betriebssystembefehle

### 3 Organisationsprinzipien

- Funktionen
- Komponenten

### 4 Zusammenfassung

## Zusammenspiel der Ebenen des „echo“-Anwendungsfalls Aufrufhierarchie



## Systemaufrufschnittstelle (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 **Prozederauftrag**
- „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

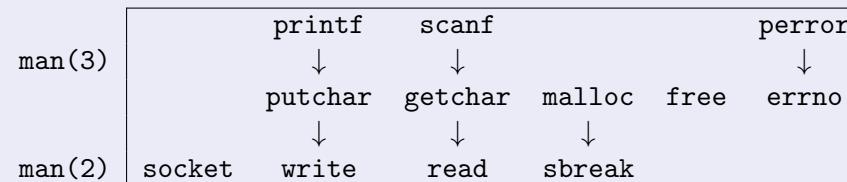
## Laufzeitumgebung (engl. *runtime environment*)

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

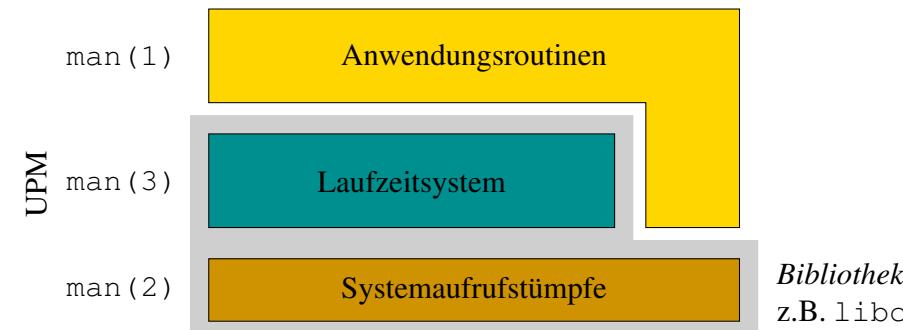
**Programmbausteine** in Form eines zur Laufzeit zur Verfügung gestellten universellen Satzes von Funktionen und Variablen

- 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
  - Kompilierer 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

### Anwendungs routinen (des Rechners)

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

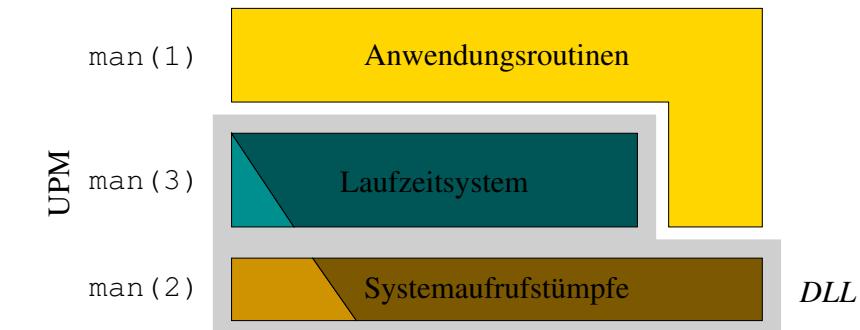
### Laufzeitsystemfunktionen (des Kompilierers/Betriebssystems)

- 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
- Assembliersprachenanweisungen
- 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 3) 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
  - Anwendungs routinen, Laufzeitsystemfunktionen, Systemaufrufstümpfe
  - statisch/dynamisch zusammengebunden als Lademodul repräsentiert