

Systemprogrammierung

Rechnerorganisation: Maschinenprogramme

Wolfgang Schröder-Preikschat

Lehrstuhl Informatik 4

Ergänzende Materialien

Gliederung

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 (Ebene₂)
- ausnahmsweise partiell interpretiert vom Betriebssystem (Ebene₃)

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*)^a
- ab einer bestimmten Ebene im Betriebssystem ist dies unzulässig

^aBeachte: 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

Maschinensprache(n)

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

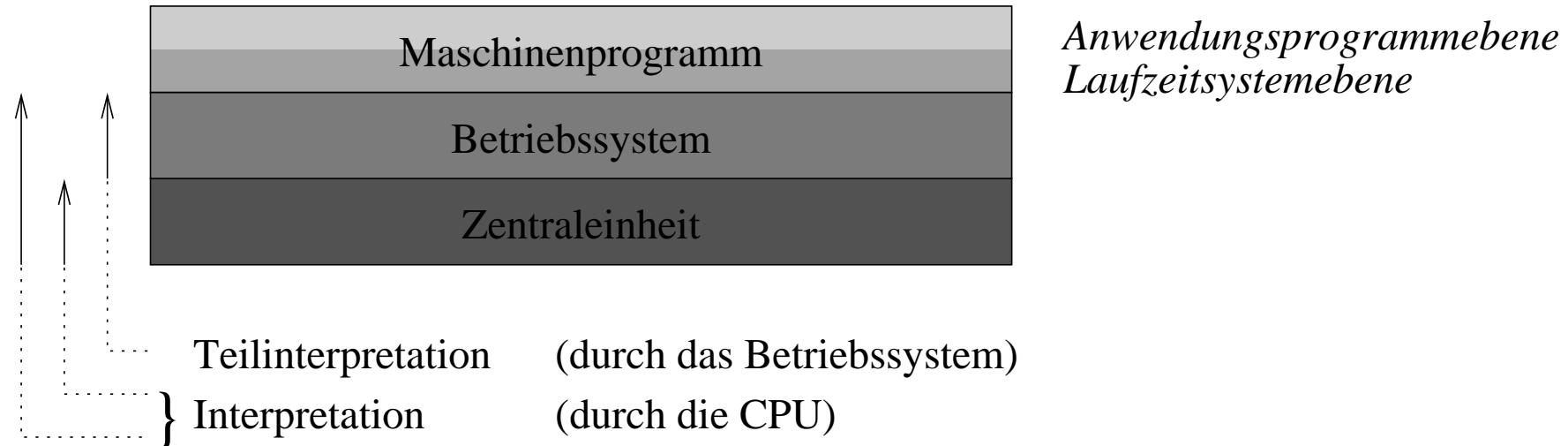
- gleichwohl werden sie (normalerweise) durch Übersetzung generiert
 - nahezu ausschließlich automatisch: Kompilierer, Assemblierer, Binder
 - in seltenen Fällen manuell: **natürlicher Kode** (engl. *native code*)¹
- sie repräsentieren sich technisch als **Lademodul** (engl. *load module*)
 - erzeugt 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

¹Binärkode des realen Prozessors, auch: Maschinenkode.

„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

Anwendungsprogrammebene: 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 \mapsto `libc.a`

Laufzeitsystemebene: ASM

Maschinenprogramm realisiert mit Ebene 4-Konzepten:

- ➊ gcc -O6 -fomit-frame-pointer -static echo.c
- ➋ 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**

- ➌ explizit die Teilinterpretation des Maschinenprogramms anfordern

Betriebssystemebene: ASM

Programm der Befehlssatzebene realisiert mit Ebene 4-Konzepten:

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

Sichern	Interpretieren	Wiederherstellen
<pre>system_call: pushl %eax cld pushl %es pushl %ds pushl %eax pushl %ebp pushl %edi pushl %esi pushl %edx pushl %ecx pushl %ebx ...</pre>	<pre>... 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</pre>	<pre>... popl %ebx popl %ecx popl %edx popl %esi popl %edi popl %ebp popl %eax popl %ds popl %es addl \$4,%esp iret</pre>

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

Betriebssystemebene: Systemaufrufe verarbeiten

Betriebssysteme realisieren einen **Befehlsabruf- und -ausführungszyklus** (engl. *fetch-execute cycle*)² 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

²Wiederkehrende 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

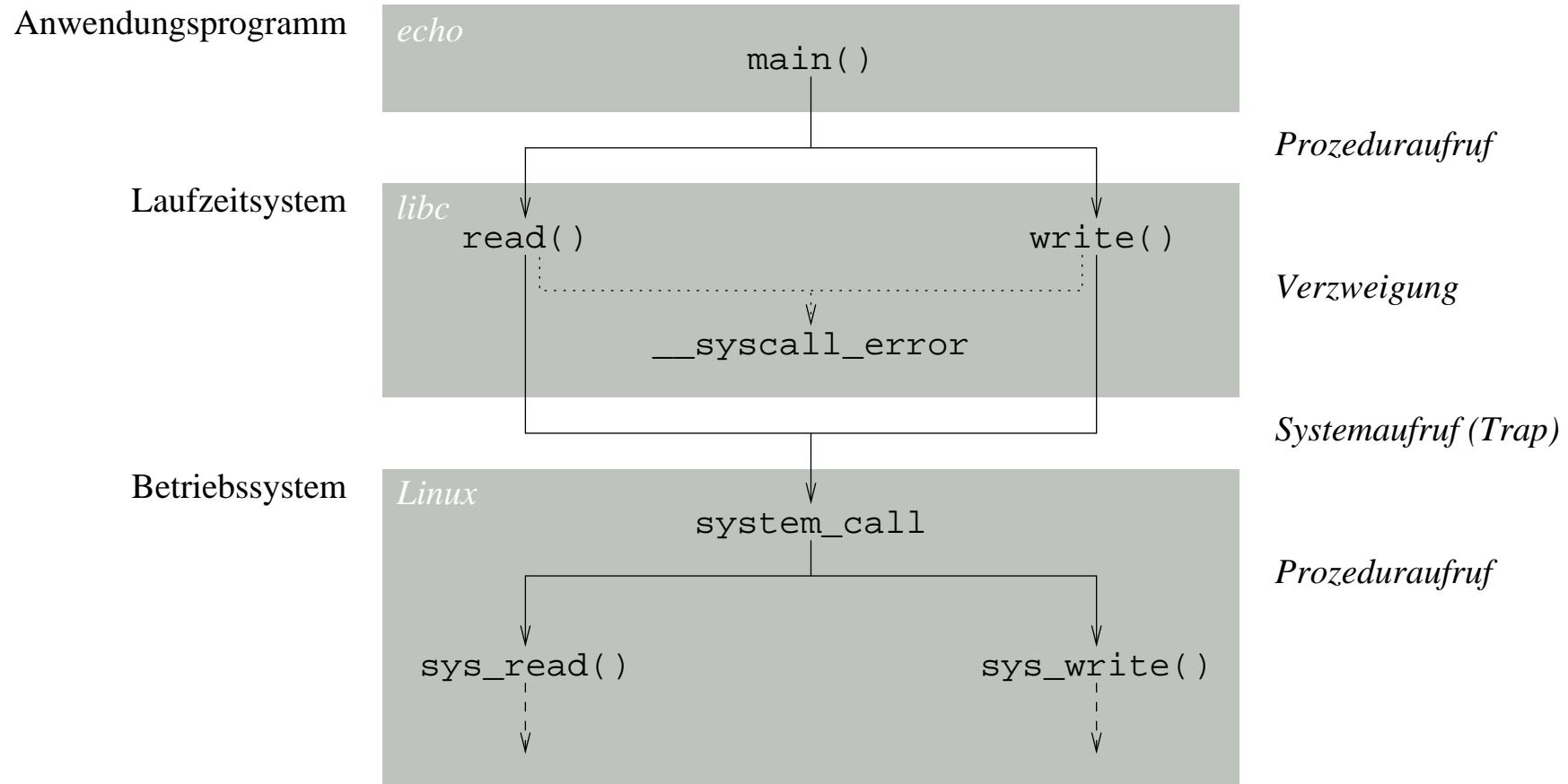
3 Organisationsprinzipien

- 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 **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

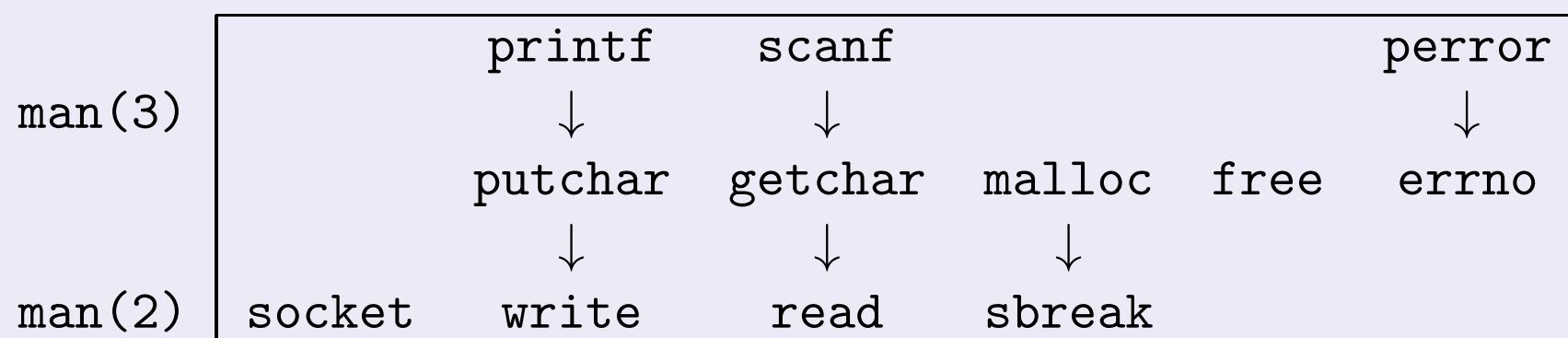
Laufzeitumgebung (engl. *runtime environment*)

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)



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)

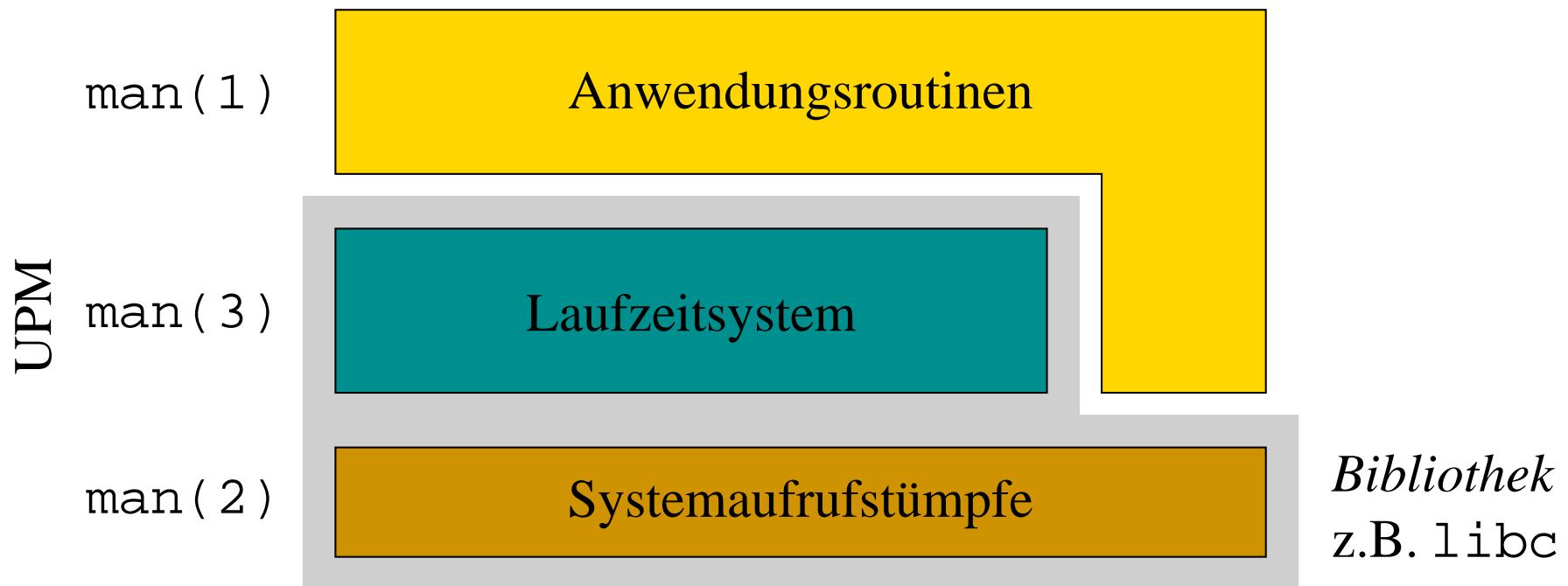
- bei C z.B. die Bibliotheksfunktionen `printf(3)` und `malloc(3)`
- setzt Betriebssystem- oder (andere) Laufzeitsystemaufrufe ab

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)

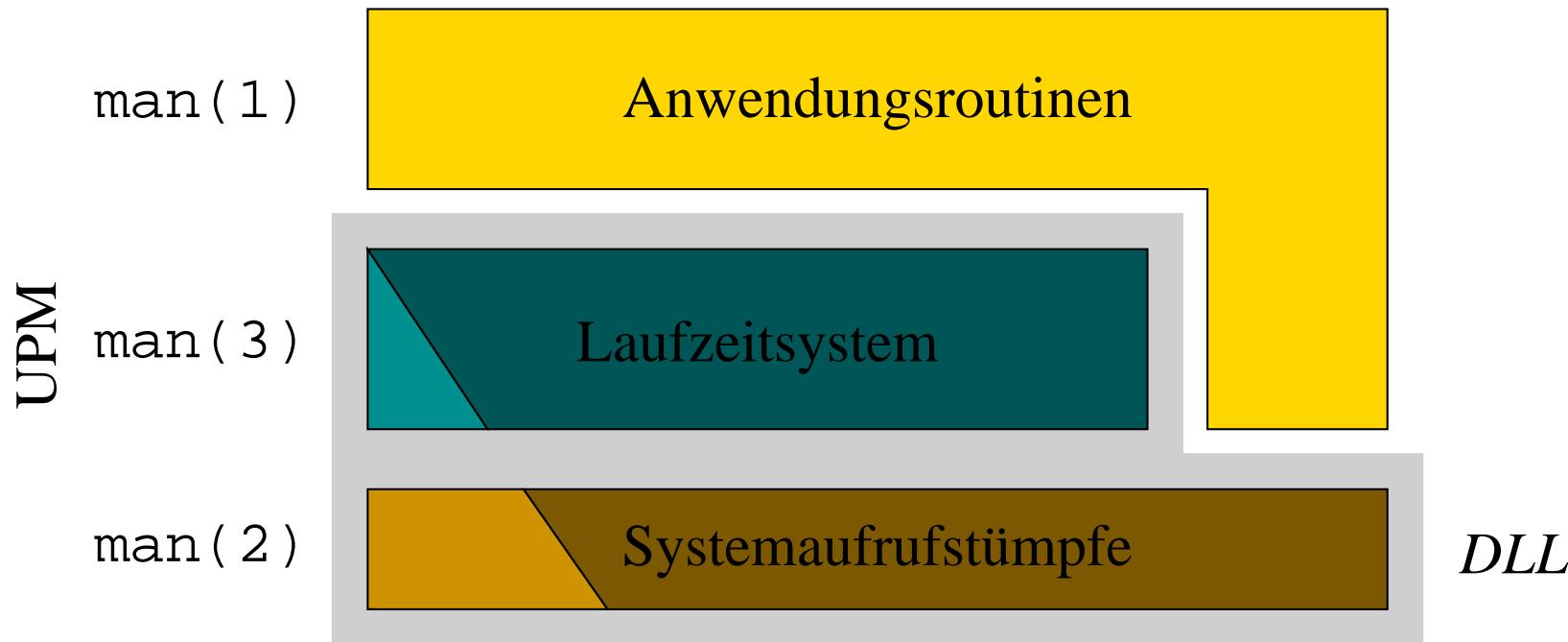
Grobstruktur von Maschinenprogrammen



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)

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

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

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>