Teil III

Organisation von Rechensystemen

Überblick

Virtuelle Maschinen
- Semantische Lücke
- Mehrebenenmaschinen
- Softwaremaschinen
- Partielle Interpretation
- Programmunterbrechung
- Nebenläufigkeit
- Virtualisierung
- Zusammenfassung

Verschiedenheit zwischen Quell- und Zielsprache

Faustregel: $\left\{ \begin{array}{lcl} \text{Quellsprache} & \rightarrow & \text{höheres} \\ \text{Zielsprache} & \rightarrow & \text{niedrigeres} \end{array} \right\}$ Abstraktionsniveau

engl. *semantic gap* [13]

The difference between the complex operations performed by high-level constructs and the simple ones provided by computer instruction sets. It was in an attempt to try to close this gap that computer architects designed increasingly complex instruction set computers.

☞ Kluft zwischen gedanklich Gemeintem und sprachlich Geäußertem

Matrix-Matrix Multiplikation

Problemskizze

Multiplikation von zwei 2×2 Matrizen:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} & a_{11}b_{12} + a_{12}b_{22} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} & a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22} \end{pmatrix}$$

Daraus lässt sich für $C = A \times B$ allgemein ableiten:

$C_{i,j} = \sum_k A_{ik} \cdot B_{kj}$

Matrix-Matrix Multiplikation (Forts.)

Umsetzung in ein Programm (`vi multiply.c`)

Implementierung in C, $N = 2$

```
typedef int Matrix [N][N];
void multiply (const Matrix a, const Matrix b, Matrix c) {
    unsigned int i, j, k;
    for (i = 0; i < N; i++)
        for (j = 0; j < N; j++) {
            c[i][j] = 0;
            for (k = 0; k < N; k++)
                c[i][j] += a[i][k] * b[k][j];
        }
}
```


Matrix-Matrix Multiplikation (Forts.)

Umwandlung in ein semantisch äquivalentes Programm (`gcc -S multiply.c`)

```
_multiply:
  pushl %ebp
  movl  %esp,%ebp
  pushl %edi
  pushl %esi
  pushl %ebx
  subl  $12,%esp
  movl  $0, -16(%ebp)
  movl  16(%ebp),%edi
L16:
  movl  $0,-20(%ebp)
  movl  -16(%ebp),%eax
  movl  -16(%ebp),%ebx
  sall  $3,%eax
  addl  %ebx,%ebx
  movl  %eax,-24(%ebp)
  .align 16
```

```
L15:
  movl  $0,(%edi,%ebx,4)
  movl  -20(%ebp),%edx
  xorl  %esi,%esi
  movl  12(%ebp),%eax
  leal  (%eax,%edx,4),%ecx
  movl  8(%ebp),%eax
  movl  -24(%ebp),%edx
  addl  %eax,%edx
L14:
  movl  (%ecx),%eax
  incl  %esi
  addl  $8,%ecx
  imull (%edx),%eax
  addl  $4,%edx
  addl  %eax,(%edi,%ebx,4)
```

```
cmpl  $1,%esi
jbe L14
incl  -20(%ebp)
incl  %ebx
cmpl  $1,-20(%ebp)
jbe L15
incl  -16(%ebp)
cmpl  $1,-16(%ebp)
jbe L16
addl  $12,%esp
popl  %ebx
popl  %esi
popl  %edi
popl  %ebp
ret
```

Matrix-Matrix Multiplikation (Forts.)

Verschiedenheit zwischen Quell- und Zielsprache

Ebene der Problemskizze ☞ 1 Summenformel

- welches Problem behandelt wird, ist (nahezu) offensichtlich
- eine semantische Lücke ist eigentlich nicht vorhanden

Ebene der Programmiersprache C ☞ 5 Komplexschritte

- welches Problem behandelt wird, ist (für Experten) noch erkennbar
- die semantische Lücke ist vergleichsweise klein

Ebene der Assembliersprache (x86) ☞ 43+n Maschinenanweisungen

- welches Problem behandelt wird, ist (eigentlich) nicht erkennbar
- die semantische Lücke ist vergleichsweise sehr groß

Matrix-Matrix Multiplikation (Forts.)

Objektmodul — das fast ausführbare Programm

Maschinenkode (x86) in Hex

```
5589E557565383EC0CC745F0000000008B7D10C745EC0000
00008B45F08B5DF0C1E00301DB8945E8908DB42600000000
C7049F000000008B55EC31F68B450C8D0C908B45088B55E8
01C28B014683C1080FAF0283C20401049F83FE0176ECFF45
EC43837DEC0176C8FF45F0837DF00176A283C40C5B5E5F5D
C3
```

Ebene der Maschinensprache (x86) ☞ 121 Bytes

- welches Problem behandelt wird, ist überhaupt nicht mehr erkennbar
- die semantische Lücke ist (nahezu) unendlich groß

Matrix-Matrix Multiplikation (Forts.)

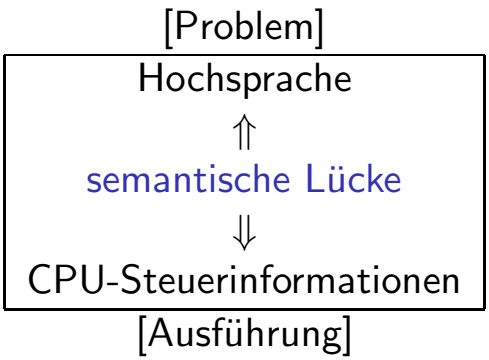
$C_{i,j} = \sum_k A_{ik} \cdot B_{kj} \stackrel{?}{\Longleftrightarrow}$ `5589E5 ... 5F5DC3`

Die Diskrepanz zwischen der vom Menschen skizzierten Problemlösung und dem dazu korrespondierenden, von der Maschine „x86“ ausführbaren Programm, ist beträchtlich.

Abstraktion half, sich auf das Wesentliche konzentrieren zu können

- eine virtuelle Maschine zur Matrixmultiplikation entstand
- die schrittweise abgebildet wurde auf eine reale Maschine

Semantische Lücke schrittweise schließen



Die Ausdehnung der Lücke variiert:

- bei gleich bleibendem Problem mit der Plattform (dem System)
- bei gleich bleibender Plattform mit dem Problem (der Anwendung)

Lückenschluss ist ganzheitlich zu sehen

Problemlösungen über virtuelle Maschinen auf die reale Maschine abbilden

Hierarchie virtueller Maschinen

Interpretation und Übersetzung

Ebene		
n	virtuelle Maschine M_n mit Maschinensprache S_n	Programme in S_n werden von einem auf einer tieferen Maschine laufenden Interpreter gedeutet oder in Programme tieferer Maschinen übersetzt
⋮	⋮	⋮
2	virtuelle Maschine M_2 mit Maschinensprache S_2	Programme in S_2 werden von einem auf M_1 bzw. M_0 laufenden Interpreter gedeutet oder nach S_1 bzw. S_0 übersetzt
1	virtuelle Maschine M_1 mit Maschinensprache S_1	Programme in S_1 werden von einem auf M_0 laufenden Interpreter gedeutet oder nach S_0 übersetzt
0	reale Maschine M_0 mit Maschinensprache S_0	Programme in S_0 werden direkt von der Hardware ausgeführt

Programme leisten die Abbildung

Kompilierer (engl. *compiler*) und Interpretierer (engl. *interpreter*)

Kom|pi|la|tor *lat.* (Zusammenträger)

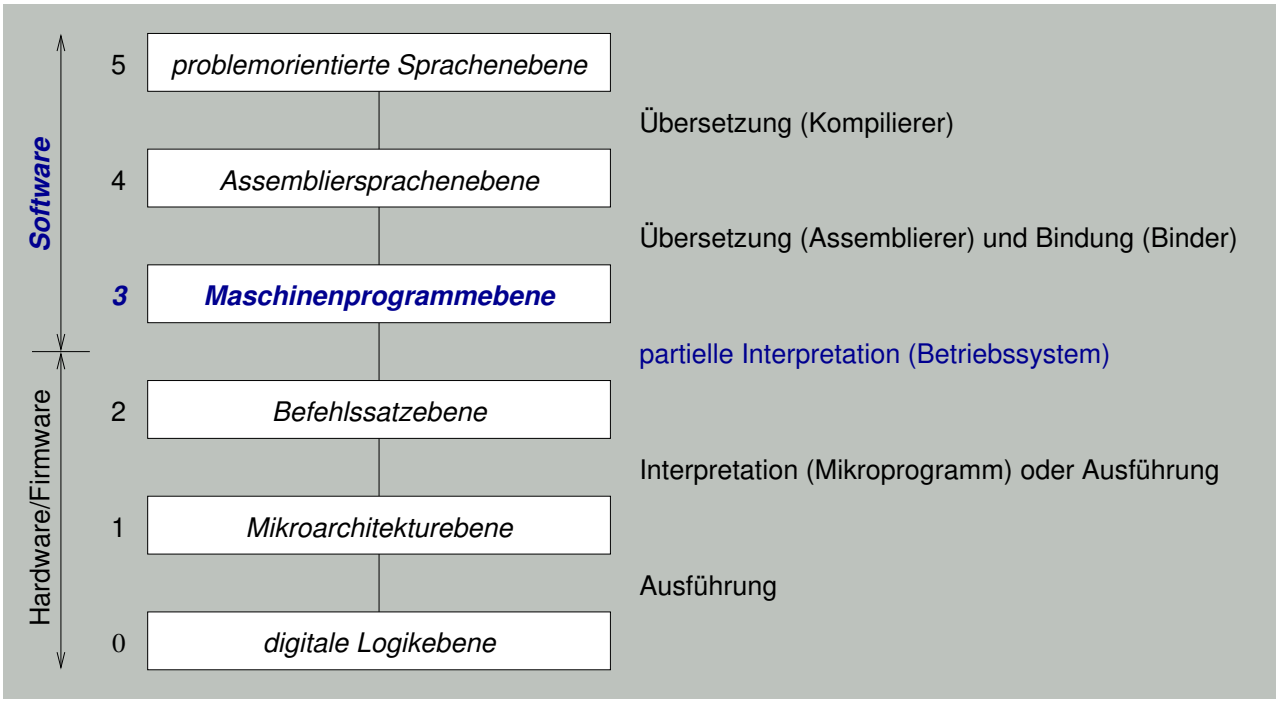
Ein typischerweise in Software realisierter *Prozessor*, der Programme einer bestimmten *Quellsprache* (z.B. C++) in semantisch äquivalente Programme einer bestimmten *Zielsprache* (z.B. C oder Assembler) transformiert.

In|ter|pret *lat.* (Ausleger, Erklärer, Deuter)

Ein in Hard-, Firm- oder Software realisierter *Prozessor*, der Programme einer bestimmten Quellsprache (z.B. Basic, Perl, C, `sh(1)`) „direkt“ ausführt. Bei *Vorübersetzung* durch einen Kompilierer werden die Programme zunächst in eine für die Interpretation günstigere Repräsentation (z.B. Pascal P-Code, Java Bytecode, x86-Befehle) transformiert.

Hardware/Software Hierarchie

Betriebssystem als Interpret



Elementaroperationen der einzelnen Ebenen

Softwaremaschinen

Problemorientierte Programmiersprachenebene

„Höhere Programmiersprachen“ erlauben die abstrakte und plattformunabhängige Formulierung von Problemlösungen. Programme setzen sich zusammen aus Konstrukten zur Selektion und Iteration, zur Formulierung von Sequenzen, Blockstrukturen, Prozeduren, zur Beschreibung von elementaren und abstrakte Datentypen und (getypten) Operatoren.

Assembliersprachenebene

Pseudobefehle (Assemblierer/Binder), mnemonisch ausgelegte Maschinenbefehle (ISA) und symbolisch bezeichnete Operanden (Speicheradressen, Register) und Adressierungsarten bilden die Programme (*symbolischer Maschinenkode*).

Elementaroperationen der einzelnen Ebenen (Forts.)

Softwaremaschinen

Maschinenprogrammebene

Legt die Betriebsarten fest, verwaltet die Betriebsmittel des Rechners und steuert bzw. überwacht die Abwicklung von Programmen. *Systemaufrufe* und *Maschinenbefehle* (ISA) bilden die Elementaroperationen der Programme (*binärer Maschinenkode*).

Brennpunkt von SOS$_I$: Betriebssysteme implementieren diese Ebene

- auf Basis der problemorientierten und Assembliersprachenebenen

Elementaroperationen der einzelnen Ebenen (Forts.)

Firm-/Hardwaremaschinen

Befehlssatzebene (engl. *instruction set architecture*, ISA)

Implementiert das *Programmiermodell* der CPU (z.B. CISC, RISC, VLIW). Programme bestehen aus *Mikroanweisungen* oder Konstrukten einer *Hardwarebeschreibungssprache* (z.B. VHDL, SystemC).

Mikroarchitekturebene

Beschreibt den Aufbau der Operations-/Steuerwerke, der Zwischenspeicher und die Befehlsverarbeitung. Programme bestehen aus Konstrukten einer *Hardwarebeschreibungssprache* (z.B. VHDL, SystemC).

Elementaroperationen der einzelnen Ebenen (Forts.)

Hardwaremaschinen

Digitale Logikebene

Bildet auf Basis von Transistoren, Gattern, Schaltnetzen und Schaltwerken die wirkliche Hardware des Rechners. Programme bestehen aus Elementen der *Boolschen Algebra*.

- maximale Flexibilität
- minimale Benutzerfreundlichkeit
- maximale Distanz von sehr vielen Problemdomänen

Abstraktionsniveau vs. Semantische Lücke

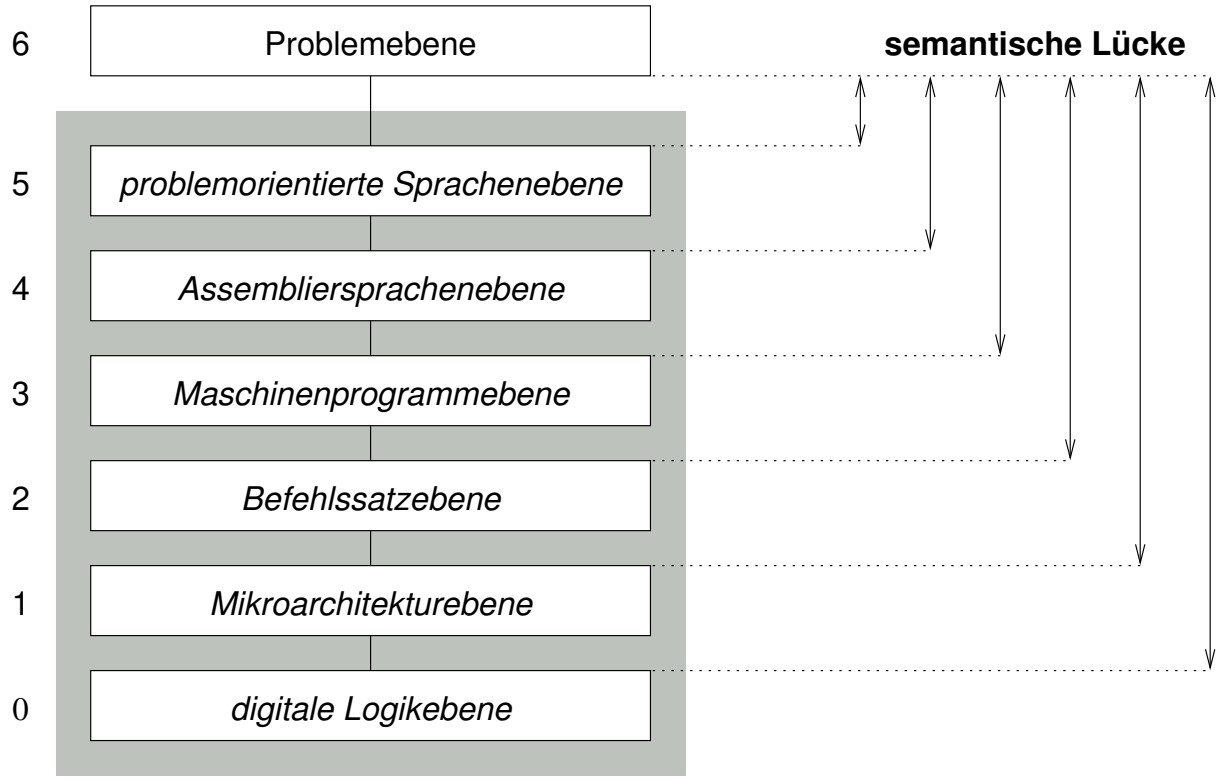


Abbildung durch Übersetzung

Ebene $_5$ $\longmapsto$ Ebene $_4$: Kompilierung

Ebene $_5$-Befehle „1:N“ in Ebene $_4$-Befehle übersetzen

- ein Hochsprachenbefehl ist eine Folge von Assembliersprachenbefehlen
  ☞ *semantisch äquivalente* Befehlsfolge
- im Zuge der Transformation ggf. Optimierungsstufen durchlaufen

Ebene $_4$ $\longmapsto$ Ebene $_3$: Assemblierung und Binden

Ebene $_4$-Befehle („Mnemoniks“) „1:1“ in Ebene $_3$-Befehle übersetzen

- ein Quellmodul in ein Objektmodul umwandeln
- mit Bibliotheken zum Maschinenprogramm zusammenbinden

Abbildung durch Interpretation

Ebene $_3$ $\longmapsto$ Ebene $_2$: Teilinterpretation (auch *partielle Interpretation*)

Ebene $_3$-Befehle als Folgen von Ebene $_2$-Befehlen ausführen

- Systemaufrufe aus den Ebene $_3$-Befehlstrom „herausfiltern“
- ein Ebene $_3$-Befehl aktiviert ein Ebene $_2$-Programm

Ebene $_2$ $\longmapsto$ Ebene $_1$: Interpretation

Ebene $_2$-Befehle als Folgen von Ebene $_1$-Befehlen ausführen

- Abruf- und Ausführungszyklus (engl. *fetch-execute-cycle*) der CPU
- ein Ebene $_2$-Befehl löst Ebene $_1$-Steueranweisungen aus

Prozessoren implementieren die Abbildungen

Ebene $_5$ ☞ Kompilierer

- Interpretation von Konstrukten/Anweisungen einer „Hochsprache“

Ebene $_4$ ☞ Assemblierer und Binder

- Interpretation von Anweisungen einer Assembliersprache

Ebene $_3$ ☞ Betriebssystem

- Interpretation von Systemaufrufen
- Ausführung von Ebene $_3$-Programmen (durch Teilinterpretation)

Ebene $_2$ ☞ Zentraleinheit (CPU)

- Interpretation von Instruktionen (an die ALU, FPU, MMU, ...)
- Ausführung von Ebene $_2$-Programmen

Programm der problemorientierten Sprachenebene

Echo

myecho.c

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

Die Funktion `read(2)` überträgt ein Zeichen von Standardeingabe (0) an die Speicheradresse `&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.

Programm der Assembliersprachenebene

myecho.s (generiert mit „gcc -O6 -S myecho.c“)

main () {...

```
main:
  pushl %ebp
  movl  %esp,%ebp
  pushl %esi
  pushl %ebx
  subl  $16,%esp
  leal  -9(%ebp),%ebx
  andl  $-16,%esp
  movl  %ebx,%esi
  .align 16
```

while (...){}

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

...}

```
  leal  -8(%ebp),%esp
  popl  %ebx
  popl  %esi
  popl  %ebp
  ret
```


Programm der Assembliersprachenebene (Forts.)

Auszüge aus der C-Bibliothek (libc.a) des Kompilierers (gcc(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
```

- Der Binder (ld(1)) wird diese Funktionen später hinzufügen
- Teilinterpretation: `int $0x80` schaltet um von Ebene 2 zu Ebene 3

Programm der Assembliersprachenebene (Forts.)

Auszüge aus Linux (kernel-source-2.4.20/arch/i386/kernel/entry.S)

Sichern

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

Behandeln

```
  ...
  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
```


Programm der problemorientierten Sprachenebene (Forts.)

Auszüge aus Linux (kernel-source-2.4.20/fs/read_write.c)

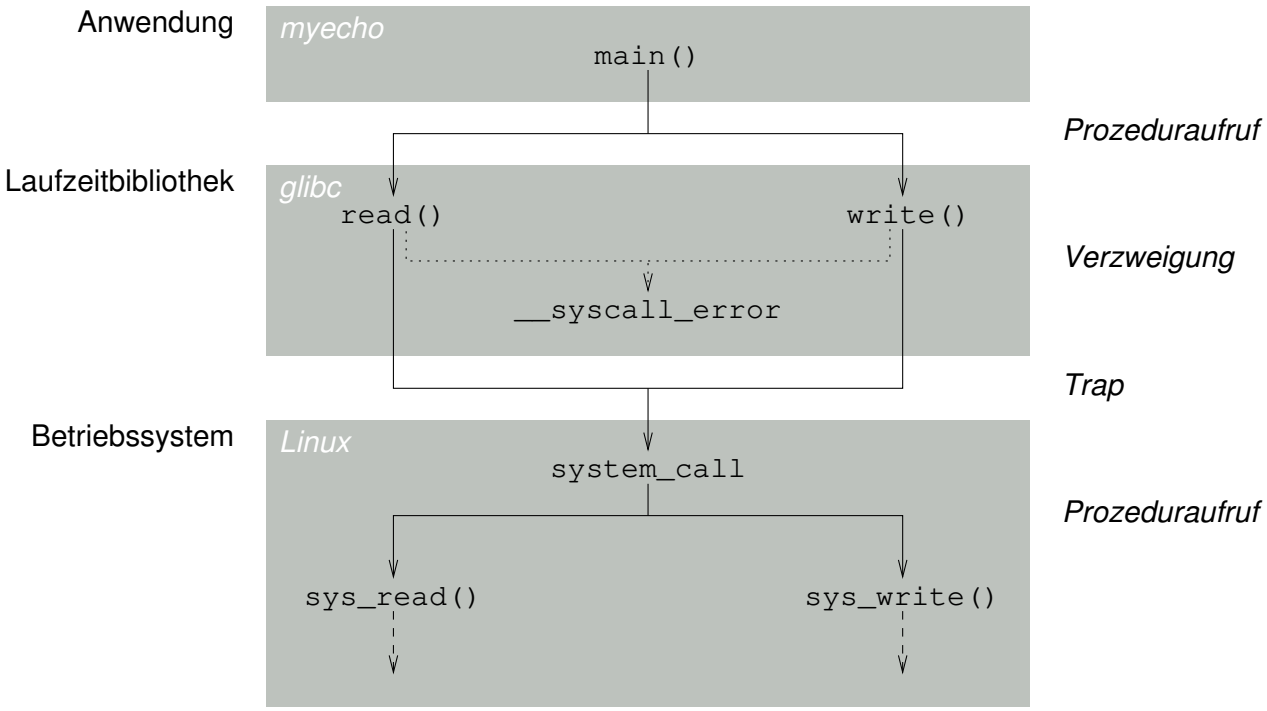
Systemaufrufe implementierende Programme

```
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 ...
```

Softwaresystem „myecho“
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 Betriebssystem

- „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 Betriebssystem
- Ein-/Ausgabeparameter in Registern übergeben, „Trap“ auslösen

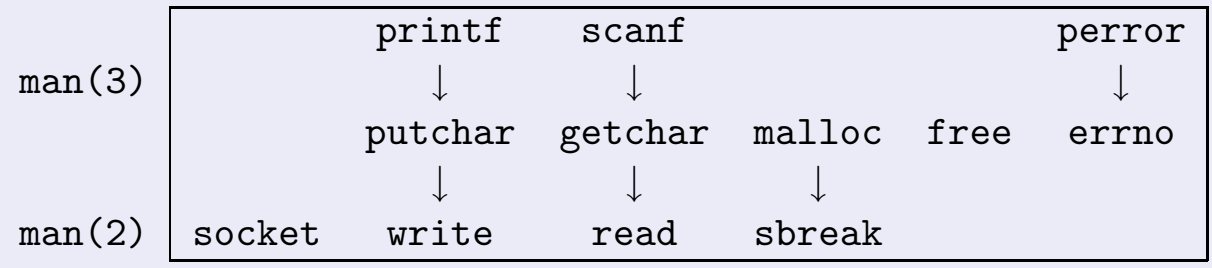
Laufzeitumgebung (engl. *runtime environment*)

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)



Organisation von Maschinenprogrammen

„Die Drei von der Tankstelle“

Anwendungsroutinen (des Rechners)

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

Laufzeitsystem (des Kompilierers/Betriebssystems)

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

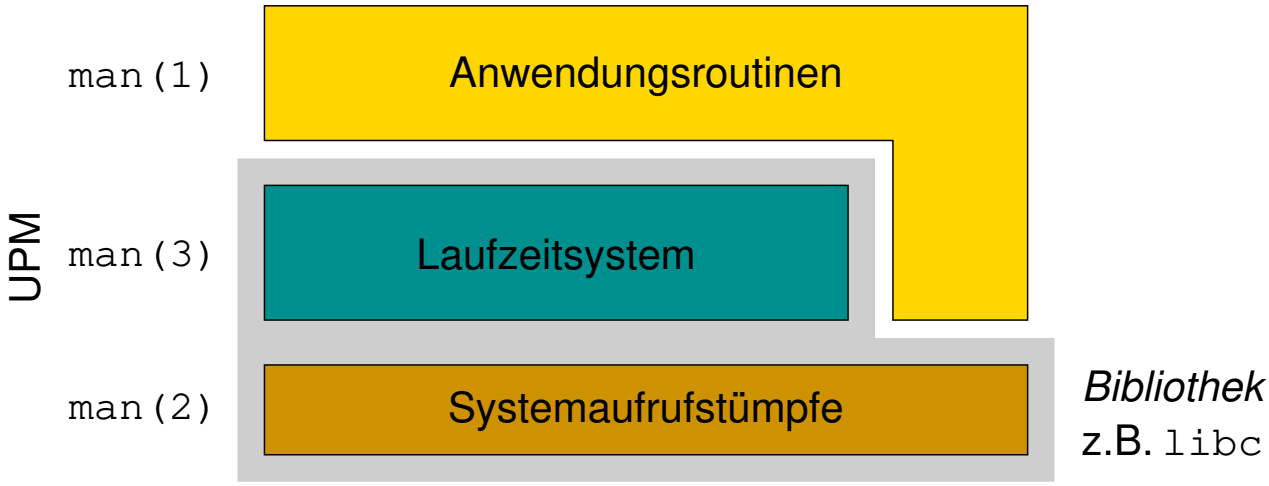
Systemaufrufstümpfe (des Betriebssystems)

- bei UNIX z.B. die Bibliotheksfunktionen `write(2)` und `sbreak(2)`
- setzen synchrone Programmunterbrechungen (d.h. Traps) ab

☞ bilden zusammengebunden ein Anwendungsprogramm

Organisation von Maschinenprogrammen (Forts.)

Software(grob)struktur innerhalb eines Benutzeradressraums

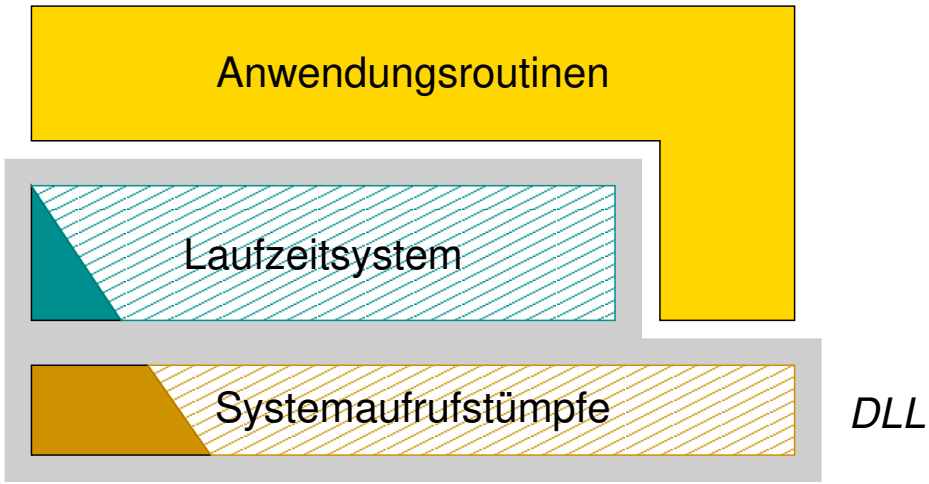


Modell für eine statische Bibliothek (`gcc` bzw. `ld -static ...`)

- auch Dienstprogramme (z.B. `ls(1)`) sind so repräsentiert
- der Aufbau spiegelt jedoch nur die logische Struktur wieder
- dynamisches Binden von Bibliotheken liefert eine andere Sicht...

Organisation von Maschinenprogrammen (Forts.)

Dynamische Bibliothek (engl. *shared library*, UNIX; *dynamic link library* (DLL), Windows)



Bibliotheksfunktionen erst bei Bedarf (vom Betriebssystem) einbinden

- z.B. beim erstmaligen Aufruf („*trap on use*“, Multics [14])
- enorme Speicherplatzersparnis — im Hintergrundspeicher (Platte) !!!
- ein bindender Lader ist Bestandteil des Betriebssystems

Zusammenspiel von Ebene 2 und Ebene 3

Elementaroperationen der Maschinenprogrammebene

Maschinenprogramme umfassen zwei Sorten von Befehlen:

1. Aufrufe an das Betriebssystem (Ebene 3)
   - explizit als Systemaufruf (engl. *system call*) kodiert
   - implizit als Programmunterbrechung (engl. *trap*, *interrupt*) ausgelöst
2. Anweisungen an die CPU (Ebene 2)

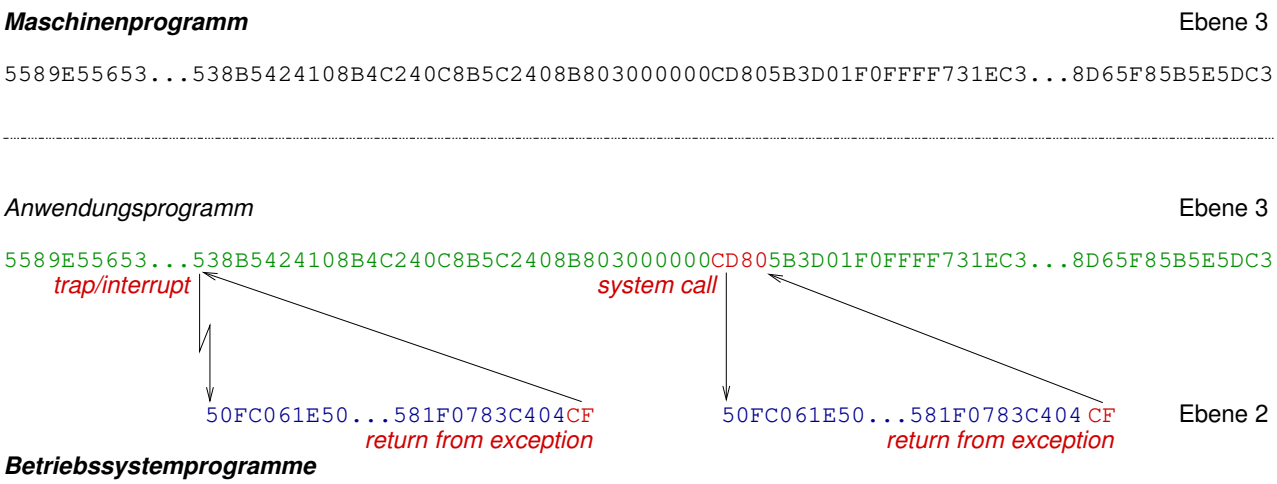
Ausführende Instanz ist immer die CPU, die nur Ebene 2-Befehle kennt

- Ebene 3-Befehle { werden „wahrgenommen“, nicht ausgeführt / signalisieren eine Ausnahme (engl. *exception*)

Das Betriebssystem fängt Ebene 3-Befehle ab, behandelt Ausnahmen

Zusammenspiel von Ebene 2 und Ebene 3 (Forts.)

Programmunterbrechungen bewirken partielle Interpretation



Programme der Maschinenprogrammebene
Hybride Ebene

Ebene $_3$-Befehle...

- sind „normale“ Befehle der Ebene $_2$, die die CPU ausführt
- sind „ausnahmebedingte“ Befehle, die das Betriebssystem ausführt

...implementieren z.B. Adressräume, Dateien, Prozesse

- Interpret dieser zusätzlichen Befehle ist das Betriebssystem

Betriebssysteme werden aktiviert...

- im Falle eines Systemaufrufs (`CD80`), programmiert
- im Falle von Ausnahmesituationen, nicht programmiert

...und deaktivieren sich immer selbst, programmiert (`CF`)

Unterbrechungsarten und Ausnahmesituationen

Zwei Kategorien von Ausnahmesituationen werden unterschieden:

1. die „Falle“ (engl. *trap*)
2. die „Unterbrechung“ (engl. *interrupt*)

Unterschiede ergeben sich hinsichtlich...

- Quelle
- Synchronität
- Vorhersagbarkeit
- Reproduzierbarbeit

Behandlung ist zwingend und grundsätzlich prozessorabhängig