

Systemprogrammierung

Grundlagen von Betriebssystemen

Teil C – VIII. Zwischenbilanz

16. Oktober 2025

Rüdiger Kapitza

(© Wolfgang Schröder-Preikschat, Rüdiger Kapitza)



Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware



Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

Systemprogrammierung 1

Lehrziele

C

UNIX

Einleitung

Rechnerorganisation

Betriebssystemkonzepte

Betriebsarten

Systemprogrammierung 2

Ausblick

Systemprogrammierung 1

Lehrziele

C

UNIX

Einleitung

Rechnerorganisation

Betriebssystemkonzepte

Betriebsarten

Systemprogrammierung 2

Ausblick

Systemprogrammierung 1

Lehrziele

Definition (Systemprogrammierung)

Erstellen von Softwareprogrammen, die Teile eines Betriebssystems sind beziehungsweise mit einem Betriebssystem direkt interagieren oder die Hardware (genauer: Zentraleinheit^a und Peripherie^b) eines Rechensystems betreiben müssen.

^acentral processing unit (CPU), ein-/mehrfach, ein-, mehr- oder vielkernig.

^bGeräte zur Ein-/Ausgabe oder Steuerung/Regelung „externer Prozesse“.

Auch schon mal zwischen zwei Stühlen sitzend:

- **Anwendungssoftware** („oben“) einerseits
 - ermöglichen, unterstützen, nicht entgegenwirken
- **Plattformsysteme** („unten“) andererseits
 - anwendungsspezifisch verfügbar machen
 - problemorientiert betreiben, bedingt verbergen
 - nachteilige Eigenschaften versuchen zu kaschieren



Quelle: arcadja.com, Franz Kott

Systemprogrammierung 1

C

Schlüsselwörter

auto	break	case	char	const	continue	default	do
double	else	enum	extern	float	for	goto	if
int	long	register	return	short	signed	sizeof	static
struct	switch	typedef	union	unsigned	void	volatile	while

Operatoren, Selektoren, Klammerungen und andere „Satzzeichen“

!	"	%	&	'	(	)	*	+	,	-	.	/
:	;	<	=	>	?	[	]	^	{	}	~	

■ was macht dieses Programm?

```
1  #include <unistd.h>
2
3  int main() {
4      printf("%d\n", getpid());
5  }
```

■ was kann man daraus machen?

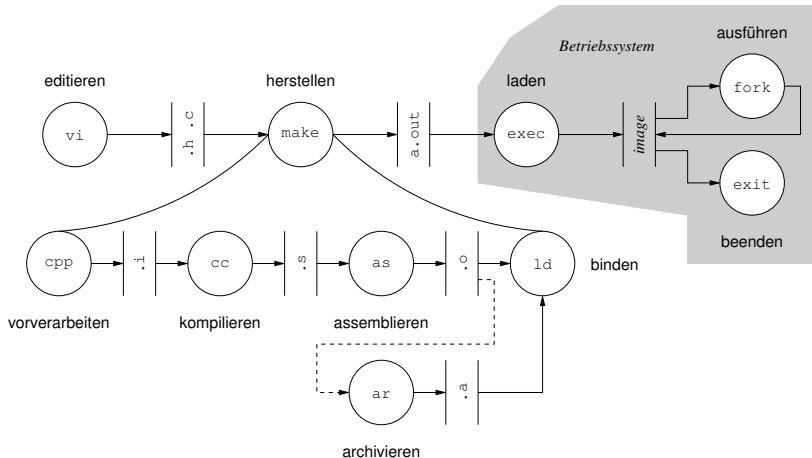
■ *buffer overflow exploit*

■ was geschieht nun?

```
6  #include <stdio.h>
7  #include <string.h>
8
9  int getpid() {
10     char buffer[20];
11     gets(buffer);
12     return strlen(buffer);
13 }
```

Systemprogrammierung 1

UNIX



Systemprogrammierung 1

Einleitung

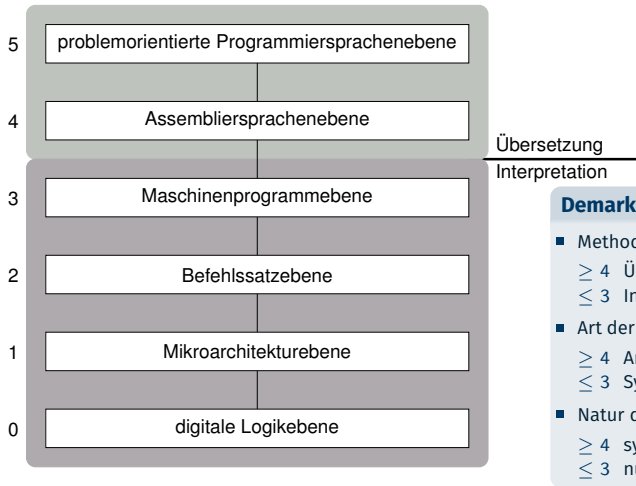
Die Funktionsweise (auch) von Betriebssystemen zu verstehen, hilft bemerkenswerte Erscheinungen innerhalb eines Rechensystems zu begreifen und in ihrer Bedeutung besser einzuschätzen.

- **Eigenschaften** (*features*) von Betriebssystemen erkennen:
 - funktionale**
 - Verwaltung der Betriebsmittel (Prozessor, Speicher, Peripherie) für eine Anwendungsdomäne
 - nichtfunktionale**
 - dabei anfallender Zeit-, Speicher-, Energieverbrauch
 - d.h., **Gütemerkmale** einer Implementierung
- aus den funktionalen Eigenschaften resultierendes **Systemverhalten** unterscheiden von Fehlern (*bugs*) des Systems
 - um Fehler kann ggf. „herum programmiert“ werden
 - um zum Anwendungsfall unpassende Eigenschaften oft jedoch nicht

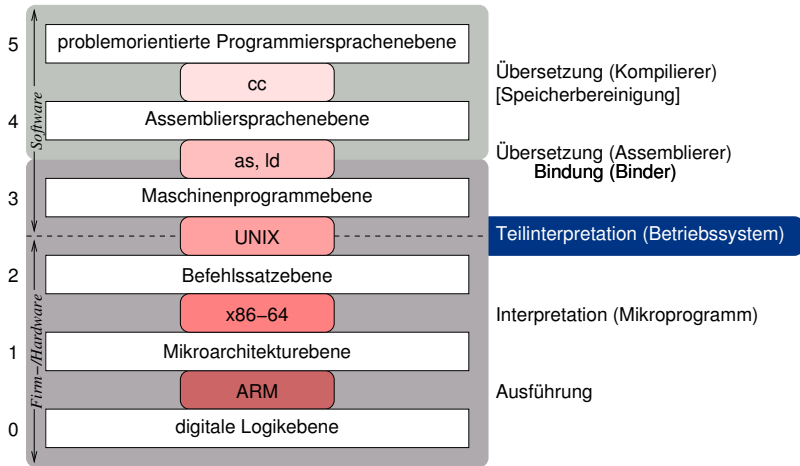
¹Analytische Lernmethode, die die Vermittlung eines Stoffes als Gesamtheit in den Mittelpunkt stellt, um dann konstituierende Elemente weiter zu untersuchen.

Systemprogrammierung 1

Rechnerorganisation



- Schichten der Ebene_[4,5] sind nicht wirklich existent
 - sie werden via Übersetzung aufgelöst und auf tiefere Ebenen abgebildet
 - so dass am Ende nur ein Maschinenprogramm (Ebene₃) übrigbleibt



- RISC auf Ebene₁ und gegebenenfalls (hier) CISC auf Ebene₂
 - nach außen „complex“, innen aber „reduced instruction set computer“
 - Intel Core oder Haswell ↔ AMD Bulldozer oder Zen (ARM)

```
1 read:
2     push %ebx
3     movl 16(%esp),%edx
4     movl 12(%esp),%ecx
5     movl 8(%esp),%ebx
6     mov $3,%eax
7     int $0x80
8     pop %ebx
9     cmp $-4095,%eax
10    jae __syscall_error
11    ret
```

- „Grenzübergangsstelle“ **Aufrufstumpf**
 - einerseits erscheint ein Systemaufruf als normaler **Prozeduraufruf**
 - andererseits bewirkt der Systemaufruf einen **Moduswechsel**
- sorgt für **Ortstransparenz** (funktional)
 - die Lokalität der aufgerufenen Systemfunktion muss nicht bekannt sein

- Systemaufrufe sind **Prozedurfernaufrufe**, um **Prozessdomänen** in kontrollierter Weise zu überwinden

- 3–5** ▪ tatsächliche Parameter (Argumente) in Registern übergeben
- 6** ▪ Systemaufrufnummer (Operationskode) in Register übergeben
- 7** ▪ Domänenwechsel (Ebene₃ ↦ Ebene₂) auslösen
 - Aufruf abfangen (*trap*) und dem Betriebssystem zustellen
- 9–10** ▪ Status überprüfen und ggf. Fehlerbehandlung durchführen

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

- Befehle der Maschinenprogrammebene, also Ebene₃-Befehle sind...
 - „normale“ Befehle der Ebene₂, die die CPU direkt ausführen kann
 - **unprivilegierte Befehle**, die in jedem Arbeitsmodus ausführbar sind
 - „unnormale“ Befehle der Ebene₂, die das Betriebssystem ausführt
 - **privilegierte Befehle**, die nur im privilegierten Arbeitsmodus ausführbar sind
- die „aus der Reihe fallenden“ Befehle stellen Adressräume, Prozesse, Speicher, Dateien und Wege zur Ein-/Ausgabe bereit
 - Interpreter dieser Befehle ist das Betriebssystem
 - der dadurch definierte Prozessor ist die **Betriebssystemmaschine**
- demzufolge ist ein Betriebssystem immer nur **ausnahmsweise** aktiv
 - es muss von außerhalb aktiviert werden
 - programmiert im Falle eines Systemaufrufs (CD80: Linux/x86) oder einer sonstigen synchronen Programmunterbrechung (*trap*)
 - nicht programmiert, also nicht vorhergesehen, im Falle einer asynchronen Programmunterbrechung (*interrupt*)
 - es deaktiviert sich immer selbst, in beiden Fällen programmiert (CF: x86)

Systemprogrammierung 1

Betriebssystemkonzepte

Betriebssysteme bringen Programme zur Ausführung, in dem dazu Prozesse erzeugt, bereitgestellt und begleitet werden

- im Informatikkontext ist ein Prozess ohne Programm nicht möglich
 - die als Programm kodierte Berechnungsvorschrift definiert den Prozess
 - das Programm legt damit den Prozess fest, gibt ihn vor
 - gegebenenfalls bewirkt, steuert, terminiert es gar andere Prozesse
 - wenn das Betriebssystem die dazu nötigen Befehle anbietet!
- ein Programm beschreibt die Art des Ablaufs eines Prozesses
 - sequentiell**
 - eine Folge von zeitlich nicht überlappenden Aktionen
 - verläuft deterministisch, das Ergebnis ist determiniert
 - parallel**
 - nicht sequentiell
- in beiden Arten besteht ein Programmablauf aus **Aktionen**

Beachte: Programmablauf und Abstraktionsebene

Ein und derselbe Programmablauf kann auf einer Abstraktionsebene sequentiell, auf einer anderen parallel sein.

- Aufgabe ist es, über die **Speicherzuteilung** an einen Prozess Buch zu führen und seine Adressraumgröße dazu passend auszulegen

Platzierungsstrategie (*placement policy*)

- wo im Hauptspeicher ist noch Platz?
- zusätzliche Aufgabe kann die **Speichervirtualisierung** sein, um den Mehrprogrammbetrieb zu maximieren

Ladestrategie (*fetch policy*)

- wann muss ein Datum im Hauptspeicher liegen?

Ersetzungsstrategie (*replacement policy*)

- welches Datum im Hauptspeicher ist ersetzbar?
- die zur Durchführung dieser Aufgaben zu verfolgenden Strategien profitieren voneinander — oder bedingen einander
 - ein Datum kann ggf. erst platziert werden, wenn Platz freigemacht wurde
 - etwa indem das Datum den Inhalt eines belegten Speicherplatzes ersetzt
 - ggf. aber ist das so ersetzte Datum später erneut zu laden
 - bevor ein Datum geladen werden kann, ist Platz dafür bereitzustellen

- normalerweise sind die **Verantwortlichkeiten** auf mehrere Ebenen innerhalb eines Rechensystems verteilt

Speicherzuteilung

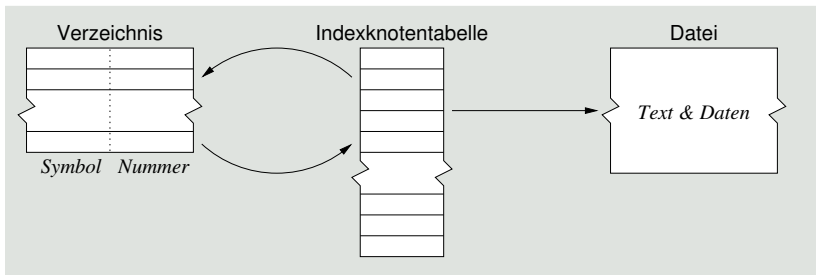
- Maschinenprogramm und Betriebssystem
- Haldenspeicher, Hauptspeicher

Speichervirtualisierung

- ist allein Aufgabe des Betriebssystems
- Haupt-/Arbeitsspeicher, Ablage

- das Maschinenprogramm verwaltet den seinem Prozess (-adressraum) jeweils zugeteilten Speicher **lokal** eigenständig
 - stellt dabei **sprachenorientierte Kriterien** in den Vordergrund
 - typisch für den Haldenspeicher $\leadsto$ `malloc/free`
- das Betriebssystem verwaltet den gesamten Haupt-/Arbeitsspeicher **global** für alle Prozessexemplare bzw. -adressräume
 - stellt dabei **systemorientierte Kriterien** in den Vordergrund
 - hilft, einen Haldenspeicher zu verwalten $\leadsto$ z.B. `sbrk/mmap`
- Maschinenprogramm und Betriebssystem gehen somit eine **Symbiose** ein, sie nehmen eine **Arbeitsteilung** vor
 - genauer gesagt: das Laufzeitsystem (`libc`) im Maschinenprogramm

- **Seitenadressierung** (*paging*) mittels **Seitentabelle** [11, S. 29–30]
 - jede von der CPU generierte Adresse wird gedeutet als $A_p = (p, o)$, wobei
 - Versatz** $o = [0, 2^w - 1]$, mit $9 \leq w \leq 30$ (*offset*)
 - Seitennummer** $p = [0, 2^{n-w} - 1]$, mit $32 \leq n \leq 64$, Tabellenindex
 - eine gewöhnliche **lineare Adresse** $\leadsto$ **eindimensionaler Adressraum**
 - d.h., Oktetts oder Worte in einer Dimension aufgereiht
- **Segmentierung** (*segmentation*) mittels **Segmenttabelle** [3, S. 37]
 - jede Adresse ist repräsentiert als Zweitupel $A_s = \langle s, d \rangle$, wobei
 - Segmentname** $s = [0, 2^m - 1]$, mit $12 \leq m \leq 18$, Tabellenindex
 - Verschiebung** $d = [0, 2^n - 1]$, mit $32 \leq n \leq 64$ (*displacement*)
 - Zweikomponentenadresse $\leadsto$ **zweidimensionaler Adressraum**
 - d.h., Segmente in der ersten und Segmentinhalte in der zweiten Dimension
- Kombination (vgl. [3, S. 38–40]):
 - **segmentierte Seitenadressierung** (*segmented paging*)
 - die Seitentabellen sind segmentiert, d.h., $A_p = (p, o)$ mit $p = (s, d)$
 - **seitennummerierte Segmentierung** (*paged segmentation*)
 - die Segmente sind seitennummeriert, d.h., $A_s = \langle s, d \rangle$ mit $d = (p, o)$ oder die Segmenteinheit generiert eine lineare Adresse A_p für die Seiteneinheit



- die **Indexknotentabelle** (*inode table*) ist ein statisches Feld (*array*) von Indexknoten und die zentrale Datenstruktur
 - ein Indexknoten ist **Deskriptor** insb. eines Verzeichnisses oder einer Datei
- das **Verzeichnis** (*directory*) ist eine **Abbildungstabelle**, es übersetzt symbolisch repräsentierte Namen in Indexknotennummern
 - eine von der Namensverwaltung des Betriebssystems definierte Datei
- die **Datei** (*file*) ist eine abgeschlossene Einheit zusammenhängender Daten beliebiger Repräsentation, Struktur und Bedeutung

Systemprogrammierung 1

Betriebsarten

- abgesetzter Betrieb: Satellitenrechner, Hauptrechner
 - Entlastung durch Spezialrechner
- überlappte Ein-/Ausgabe: DMA, *Interrupts*
 - nebenläufige Programmausführung
- überlappte Auftragsverarbeitung: Einplanung, Vorgriff
 - Verarbeitungsstrom von Aufträgen
- abgesetzte Ein-/Ausgabe: *Spooling*
 - Entkopplung durch Pufferbereiche
- Mehrprogrammbetrieb: *Multiprogramming*
 - Multiplexen der CPU
- dynamisches Laden: Überlagerung (*overlay*)
 - programmiertes Nachladen von Programmbestandteilen

- Dialogbetrieb: Dialogstationen
 - mehrere Benutzer gleichzeitig bedienen können
- Hintergrundbetrieb: Mischbetrieb
 - Programme im Vordergrund starten
- Teilnehmerbetrieb: Zeitscheibe, *Timesharing*
 - eigene Dialogprozesse absetzen können
- Teilhafterbetrieb: residente Dialogprozesse
 - sich gemeinsame Dialogprozesse teilen können
- Multiprozessorbetrieb: Parallelrechner, SMP
 - Parallelverarbeitung von Programmen
- Speicheraustausch: *Swapping, Paging*
 - von ganzen Prozessadressräumen oder einzelnen Bestandteilen

- externe (physikalische) Prozesse definieren, was genau bei einer nicht termingerecht geleisteten Berechnung zu geschehen hat:
 - weich** (soft) auch „schwach“
 - das Ergebnis ist weiterhin von Nutzen, verliert jedoch mit jedem weiteren Zeitverzug des internen Prozesses zunehmend an Wert
 - die Terminverletzung ist tolerierbar
 - fest** (firm) auch „stark“
 - das Ergebnis ist wertlos, wird verworfen, der interne Prozess wird abgebrochen und erneut bereitgestellt
 - die Terminverletzung ist tolerierbar
 - hart** (hard) auch „strikt“
 - Verspätung des Ergebnisses kann zur „Katastrophe“ führen, dem int. Prozess wird eine **Ausnahmesituation** zugestellt
 - Terminverletzung ist keinesfalls tolerierbar — aber möglich...
- ggf. zusätzlich geforderte Randbedingung ist die Termineinhaltung unter allen Last- und Fehlerbedingungen

Systemprogrammierung 1

Lehrziele

C

UNIX

Einleitung

Rechnerorganisation

Betriebssystemkonzepte

Betriebsarten

Systemprogrammierung 2

Ausblick

Systemprogrammierung 2

Ausblick

■ Prozessverwaltung

- Einplanung (klassisch, Fallstudien)
- Koroutinen, Programmfäden, Einlastung

■ Synchronisation

- ein-/mehrseitig, blockierend/nicht-blockierend
- Verklemmungen (Gegenmaßnahmen, Auflösung)

■ Speicherverwaltung

- Adressräume, MMU (Pentium)
- Disziplinen, virtueller Speicher, Arbeitsmenge

■ Dateiverwaltung

- Organisation des Hintergrundspeichers
- Datenverfügbarkeit (RAID)

- [1] KLEINÖDER, J. :
Kurzeinführung in C.
In: [13], Kapitel 2
- [2] KLEINÖDER, J. :
Vom C-Programm zum UNIX-Prozess.
In: [13], Kapitel 3
- [3] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Adressbindung.
In: [13], Kapitel 6.3
- [4] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Betriebssystemmaschine.
In: [13], Kapitel 5.3

- [5] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Dialog- und Echtzeitverarbeitung.
In: [13], Kapitel 7.2
- [6] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Einführung.
In: [13], Kapitel 4
- [7] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Maschinenprogramme.
In: [13], Kapitel 5.2
- [8] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Organisation.
In: [13], Kapitel 1

- [9] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Prozesse.
In: [13], Kapitel 6.1
- [10] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Rechnerorganisation.
In: [13], Kapitel 5.1
- [11] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Speicher.
In: [13], Kapitel 6.2
- [12] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Stapelverarbeitung.
In: [13], Kapitel 7.1

- [13] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. ; LEHRSTUHL INFORMATIK
4 (Hrsg.):
Systemprogrammierung.
FAU Erlangen-Nürnberg, 2015 (Vorlesungsfolien)