GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT
GÖTTINGEN

Informatik II

SS 2005

Kapitel 5: Betriebssysteme

Dr. Michael Ebner
Dipl.-Inf. René Soltwisch

Lehrstuhl für Telematik
Institut für Informatik

Überblick

- Einführung
- Prozessverwaltung
- Speicherverwaltung
- Ein- und Ausgabe
- Dateisysteme

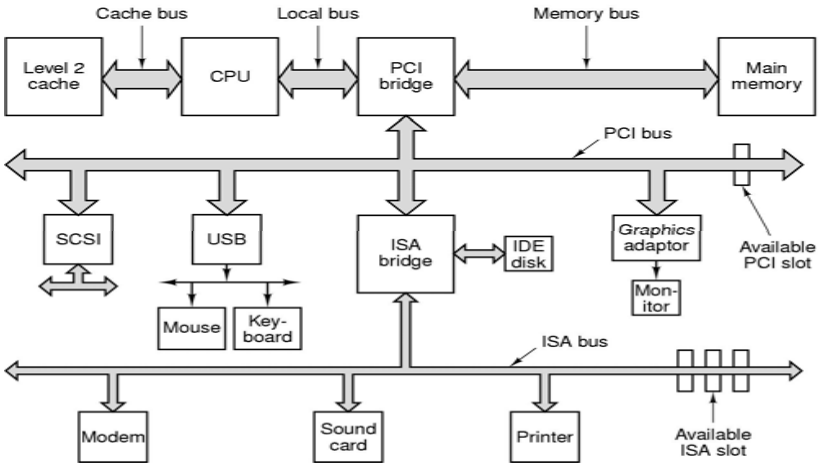
Literatur (1/2)

- Das Kapitel orientiert sich an
  - William Stallings: „Betriebssysteme - Prinzipien und Umsetzung“, Prentice Hall (Pearson Studium), 4. überarbeitete Auflage, 2003, ISBN 3-8273-7030-2
    (englisch: „Operating Systems: Internals and Design Principles“)
- Foliensätze (aus denen Folien übernommen wurden):
  - Universität Lübeck (ehemals Universität Braunschweig), Prof. Dr. S. Fischer:
    http://www.itm.uni-luebeck.de/teaching/ws0405/bks/index.html?lang=de
  - Universität Karlsruhe, Herr Liefländer:
    http://i30www.ira.uka.de/teaching/currentcourses/lecture.php?courseid=91
  - Für die Genehmigung einen großen Dank an die Autoren!

Literatur (2/2)

- Andere, empfehlenswerte Bücher:
  - A. Tanenbaum: „Moderne Betriebssysteme“, Prentice-Hall (Pearson Studium), ISBN 3-8273-7019-1
    (englisch: „Modern Operating Systems“)
    - Daran orientiert sich die Spezialvorlesung Betriebssysteme
  - A. Silberschatz, P. Galvin, G. Gagne: „Operating System Concepts“, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-41743-2
- Foliensätze zu Büchern:
  - Tanenbaum: http://www.cs.vu.nl/~ast/books/mos2/
  - Stallings: http://www.williamstallings.com/OS4e.html

Architektur eines Pentiumsystems



Potentielle Systemkomponenten

Task Semantic	Objects	Example Operation
GUI/shell	window	execute shell script
Application	a.out	quit, kill, …
File System	directories, files	open, close, read,
Devices	printer, display	open, write, ...
Communication	ports	send, receive, …
Virtual Memory	segments, pages	write, fetch
Secondary Store	chunks, blocks	allocate, free,
Processes	task queue	exit, create…
Threads	ready queue	wakeup, execute,
Interrupts	interrupt handler	invoke, mask, ...

Was ist ein Betriebssystem?

- Silberschatz:
  „An operating system is similar to a government... Like a government the operating system performs no useful function by its self.“
- DIN 44300:
  „Die Programme eines digitalen Rechensystems, die zusammen mit den Eigenschaften dieser Rechenanlage die Basis der möglichen Betriebsarten des digitalen Rechensystems bilden und die insbesondere die Abwicklung von Programmen steuern und überwachen.“

Motivation

- Wo gibt es Betriebssysteme?
- Beispiele
  - Arbeitsplatzrechner, Großrechner
  - Netzwerkgeräte, wie Router, Bridges, Gateways, etc.
  - Auto
  - Flugzeug-Cockpit
  - Waschmaschine
  - Chipkarte
  - Personal Digital Assistants (PDAs)
  - Mobiles Telefon
  - Spielekonsole (wie z.B. Playstation)
  - etc.

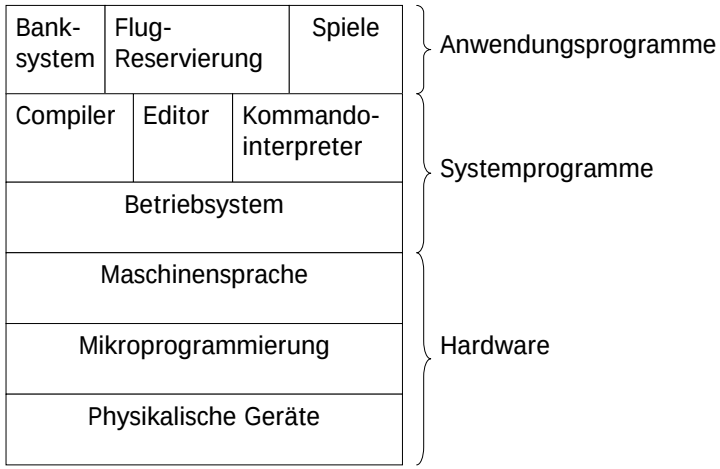
Ziele und Randbedingungen

- Ziele eines Betriebssystems
  - Anpassung der Benutzerwelt an die Maschinenwelt
  - Organisation und Koordination des Betriebsablaufs
  - Steuerung und Protokollierung des Betriebsablaufs
- Randbedingungen
  - Effizienter Einsatz von Betriebsmitteln
  - Geringer Rechenaufwand
  - Robustheit
  - Sicherheit

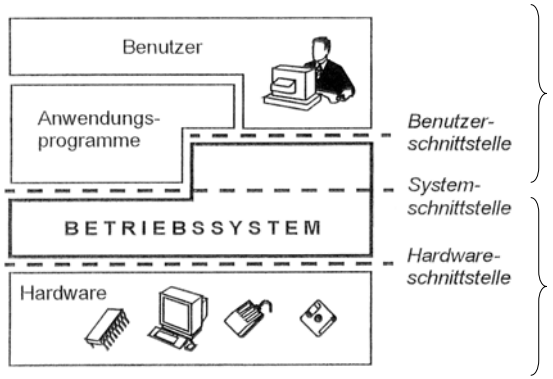
Definitionen eines Betriebssystems

- Definition Betriebssystem als virtuelle Maschine
  - Ein Betriebssystem ist eine *virtuelle Maschine*, die dem Anwender eine einfache (dateiorientierte) Schnittstelle zur Hardware zur Verfügung stellt und einem die Programmierung dieser Hardware auf hohem logischen Niveau ermöglicht.
- Definition Betriebssystem als Ressourcenverwalter
  - Ein Betriebssystem bezeichnet alle Programme eines Rechensystems, die die Ausführung der Benutzerprogramme, die Verteilung der Ressourcen auf die Benutzerprogramme und die Aufrechterhaltung der Betriebsart steuern und überwachen.
- Definition Ressourcen (Betriebsmittel)
  - Die *Ressourcen* (*Betriebsmittel*) eines Betriebssystems sind alle Hard- und Softwarekomponenten, die für die Programmausführung relevant sind.
    - Betriebsmittel: Prozessor, Hauptspeicher, I/O-Geräte, Hintergrundspeicher, etc.

Schichten eines Rechnersystems



Zwei Sichten auf ein Betriebssystem



Anwendersicht:
- Top-Down-Sicht
- Betriebssystem ist eine *virtuelle Maschine*

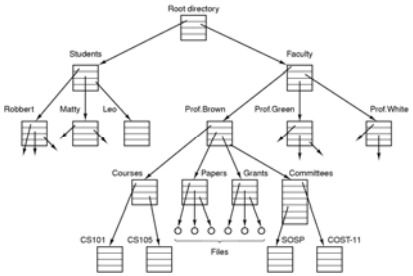
BS-Entwicklersicht:
- Bottom-Up-Sicht
- Betriebssystem ist ein *Betriebsmittel-* (*Ressourcen-*) *Verwalter*

Aufgaben eines Betriebssystems (1/5)

- Prozessverwaltung
  (Ein Prozess oder auch Task ist ein in Ausführung befindliches Programm)
  - Erzeugen und Löschen von Prozessen
  - Prozessorzuteilung (Scheduling)
  - Prozesskommunikation
  - Synchronisation nebenläufiger Prozesse, die gemeinsame Daten benutzen
- Speicherverwaltung
  - Zuteilung des verfügbaren physikalischen Speichers an Prozesse
  - Einbeziehen des Hintergrundspeichers (Platte) durch virtuelle Adressierung, demand Paging, Swapping (= Ein-/Auslagern von Prozessen), etc.

Aufgaben eines Betriebssystems (2/5)

- Verwaltung des Dateisystems
  - Logische Sicht auf Speichereinheiten (Dateien)
    - Benutzer arbeitet mit Dateinamen. Wie und wo die Dateien gespeichert werden, ist ihm egal.
  - Systemaufrufe für Dateioperationen
    - Erzeugen, Löschen, Öffnen, Lesen, Schreiben, Kopieren, etc.
  - Strukturierung mittels Verzeichnissen (Directory)



Aufgaben eines Betriebssystems (3/5)

- Verwaltung des Dateisystems (cont.)
  - Schutz von Dateien und Verzeichnissen vor unberechtigtem Zugriff

Unix: 9-Bit für Zugriffsrechte (Read, Write, eXecute)
Datei/Verzeichnis gehört einem Eigentümer (user) und einer Benutzergruppe (group, z.B. Mitarbeiter, Projekt, etc.)
z.B.

user	group	others	Dateiname
rwx	r--	r--	Uebung.txt

Befehl:

```
> chmod g+w Uebung.txt
```

führt zu:

user	group	others	Dateiname
rwx	rw-	r--	Uebung.txt

Aufgaben eines Betriebssystems (4/5)

- Geräteverwaltung
  - Auswahl und Bereitstellung von I/O-Geräten
  - Anpassung an physikalische Eigenschaften der Geräte
  - Überwachung der Datenübertragung
- Monitoring, Accounting, Auditing
  - Erstellen & Verwalten von Systemstatistiken
    - Aktuelle Auslastung
    - Aktueller freier Speicher
    - Netzverkehr
  - Optionale Aufgaben
    - Laufzeit von Prozessen mitprotokollieren
    - Speicherbedarf von Prozessen mitprotokollieren
    - Eingeloggte Benutzer mitprotokollieren
    - etc.

Aufgaben eines Betriebssystems (5/5)

- Weitere wichtige Aspekte:
  - Fehlertoleranz
    - Graceful Degradation: Beim Ausfall einzelner Komponenten läuft das System mit vollem Funktionsumfang mit verminderter Leistung weiter.
    - Fehlertoleranz wird durch Redundanz erkauft.
  - Realzeitbetrieb
    - Betriebssystem muss den Realzeit-kritischen Prozessen die Betriebsmittel so zuteilen, dass die angeforderten Zeitanforderungen eingehalten werden.
    - Für zeitkritische Systeme: Meßsysteme, Anlagensteuerungen, etc.
  - Benutzeroberflächen
    - Betriebssystem muss eine ansprechende Benutzerschnittstelle für die eigene Bedienung enthalten.
    - Betriebssystem muss Funktionen bereitstellen, mit denen aus Anwendungsprogrammen heraus auf die Benutzerschnittstelle zugegriffen werden kann.

Strukturen von Betriebssystemen

- Modularisiert in Komponenten und Subsysteme
- Kern („kernel“) läuft ständig und parallel zu anderen System- und Anwendungsprozessen
- Systemprogramme werden nur bei Bedarf geladen
- Dämonen („daemons“) sind Hilfsprozesse, die ständig existieren, aber meist passiv sind.
  - Warten auf ein Ereignis oder
  - schauen selbst zeitgesteuert nach, ob Arbeit da ist.

User und Kernel Mode

- CPUs laufen in zwei Modi, **kernel mode** und **user mode**
- Benutzermodus (user mode)
  - Prozessor bearbeitet ein Anwendungsprogramm
  - Befehlssatz und verfügbare Register sind beschränkt
  - Mögliche Beschränkung des Zugriffs auf die Hardware (hardware protection)
  - Direkter Zugriff auf andere in Ausführung befindliche Programme ist verboten
  - niedrigere Priorität
- Betriebssystemmodus (kernel mode)
  - Prozessor bearbeitet Betriebssystem
  - Alle Befehle und Register sind verfügbar
  - Direkter, uneingeschränkter Zugriff auf die Hardware
  - Manipulation interner Daten laufender Programme möglich
  - höhere Priorität

Einstiegspunkte in ein Betriebssystem

- Systemaufrufe
  - synchron
  - Parameterübergabe über z.B. Register oder Stack
- Hardware Traps
  - synchron (z.B. Division durch 0)
  - Fehler wird an Applikation weitergeleitet
- Hardware Interrupt (Unterbrechung)
  - asynchron (z.B. Modem)
- Software Interrupt (Unterbrechung)
  - asynchron

Formen von Betriebssystemen

- Stapelverarbeitung (batch processing)
- Dialogverarbeitung (time sharing)
- Echtzeitverarbeitung (real-time processing)
- Verteilte Verarbeitung (distributed processing)
- Eingebettete Betriebssysteme
- Smart-Card Betriebssysteme
- ...

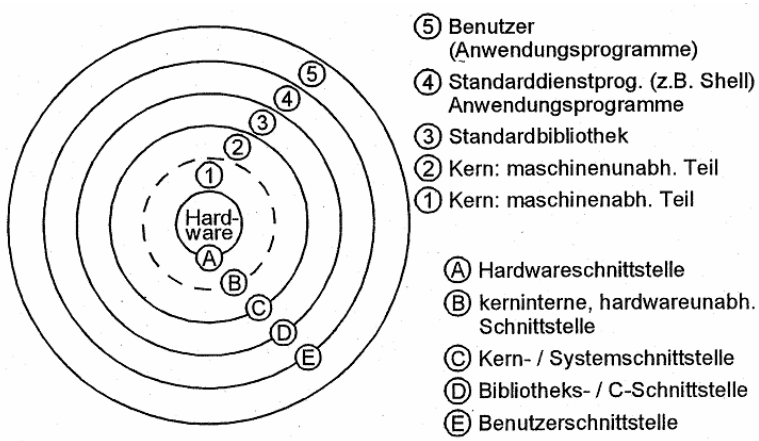
Architekturen von Betriebssystemen (1/2)

- Monolithische Systeme
  - Sammlung von Prozeduren und Funktionen ohne (oder nur mit minimaler) Struktur („The big mess.“, A. Tanenbaum)
- Geschichtete Systeme (oder Hierarchische oder Schalen)
  - mehrere Schichten wobei Schicht n+1 auf Schicht n aufbaut und neue Funktionalität bereitstellt
  - Vereinfachte Fehlersuche und Qualitätssicherung
  - Funktionszuweisung zu einer Schicht schwierig
  - Strikte Einhaltung der Schichten und strenge Parameterprüfung erhöht den Overhead an den Schichtübergängen
- Virtuelle Maschinen
  - Abstraktion betrifft nicht nur die Hardware, sondern kann auch höhere Funktionen betreffen.
  - Emulation der Hardware zu so genannten virtuellen Maschinen (VM)
  - Gleichzeitig verschiedene Betriebssysteme auf den VMs
  - z.B. Java Virtual Machine, VMware, VirtualPC, User Mode Linux (UML)

Architekturen von Betriebssystemen (2/2)

- Minimale Kerne (engl. microkernel)
  - Kern mit minimalen Betriebssystemfunktionen (Kommunikationsprimitive und elementares multi-programming) um einen großen Hardware-nahen Kern zu vermeiden
  - Minimale Kerne folgen dem Client-Server-Modell in verteilten Systemen
  - Server können im Benutzermodus laufen und in einem Netzwerk verteilt werden (zentralisierte und verteilte Realisierung möglich)
  - Vermehrte Kommunikation führt zu mehr Overhead
  - Trennung von Mechanismen und Strategien

Allgemeine Schalenstruktur von UNIX bzw. Linux



Windows Architektur

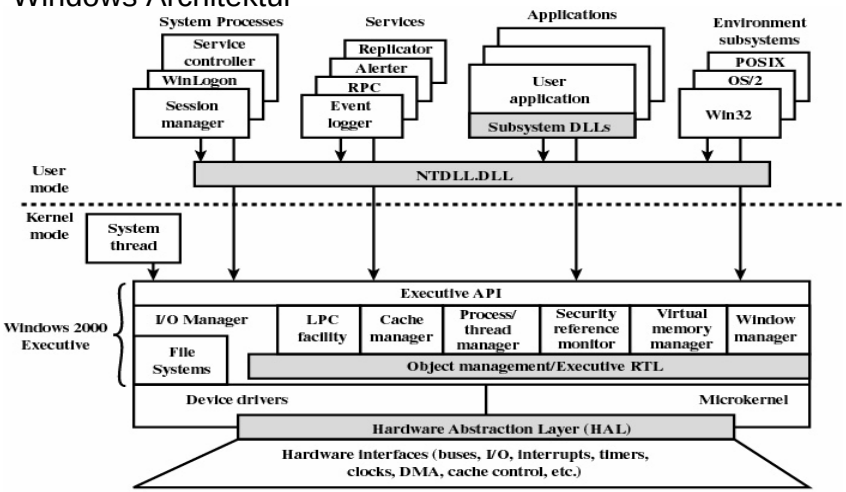


Figure 2.13 Windows 2000 Architecture

Standardisierung

- Einige relevante Standards
  - AT&T: *System V Interface Definition (SVID)* 1985
  - OSF: *Distributed Computing Environment (DCE)* 1995
  - OSF: *Motif 2.0 Graphical User Interface Toolkit* 1994
  - X/OPEN *Portability Guide (XPG-1, ..., XPG-4)* 1984
  - IEEE *Portable Operating System Interface based on UNIX (POSIX)* 1989
  - OpenGroup: *Single UNIX Specification Version 2* 1997
  - OpenGroup: *Common Desktop Environment (CDE) 1.0* 1996
  - ANSI/ISO: *Programmiersprache C (X3.159, ISO/IEC 9899)* 1989
  - ANSI/ISO: *Programmiersprache C++ (X3J16)* 1998

POSIX Standards

- Standardisierung von Betriebssystemfunktionen mit dem Ziel, die Portabilität von Programmen zu verbessern.
- POSIX-Standards werden durch eine Arbeitsgruppe des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ausgearbeitet und lehnen sich an UNIX an.
- POSIX Standards (Stand 1994)

POSIX.0	Guide and overview	POSIX.11	Transaction processing
POSIX.1	Library functions	POSIX.12	Protocol independent communication
POSIX.2	Shell and utilities	POSIX.13	Real-time profiles
POSIX.3	Test methods and conformance	POSIX.14	Multiprocessor profile
POSIX.4	Real-time extensions	POSIX.15	Batch/supercomputer extensions
POSIX.5	Ada language binding to POSIX.1	POSIX.16	Language-independent POSIX.1
POSIX.6	Security extensions	POSIX.17	Directory/name services
POSIX.7	System administration	POSIX.18	Basic POSIX system profile
POSIX.8	Transparent file access	POSIX.19	Fortran-90 binding to POSIX.4
POSIX.9	Fortran 77 binding to POSIX.1	POSIX.20	Ada binding to POSIX.4
POSIX.10	Supercomputing profile	POSIX.21	Distributed real-time

Ausblick

- Kurzer Blick auf Konzepte zur Realisierung der Aufgaben eines Betriebssystems
- Einfluss auf Programmierung von Anwenderprogrammen
  - Die Prozessverwaltung wird daher genauer vorgestellt
- Es werden weiterhin Konzepte der folgenden, grundlegenden Teilgebiete kurz betrachtet
  - Speicherverwaltung
  - Ein- und Ausgabe
  - Dateisysteme
- Studenten des Studienganges „Angewandte Informatik“ wird der Besuch der Spezialvorlesung dringend empfohlen!

Prozessverwaltung

- **Prozesse und Threads**
- Prozess-Scheduling
- Interprozesskommunikation
- Verklemmungen

Prozesse

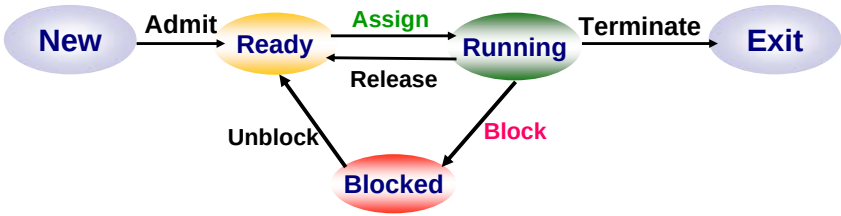
- Ein Prozess ist der **Ablauf** eines sequentiellen Programms.
- Benötigt Betriebsmittel (CPU, Speicher, Dateien, etc.) und ist selbst ein Betriebsmittel.
- Wird vom Betriebssystem verwaltet (Erzeugung, Terminierung, Scheduling, etc.)
- Ein Prozessor führt in jeder Zeiteinheit maximal einen Prozess aus. Laufen mehrere Prozesse, dann finden Prozesswechsel statt. Das Betriebssystem entscheidet über die Prozesswechsel.
  - Wir gehen von einem einfachen Prozessor aus. Prozessoren mit Hyperthreading, etc. können intern wiederum als mehrere, einfache Prozessoren angesehen werden.
- Prozesse sind gegeneinander abgeschottet, d.h. jeder besitzt (virtuell) seine eigene Betriebsmittel, wie etwa den Adressraum. Das Betriebssystem sorgt für die Abschottung.
- Wir gehen von voneinander unabhängigen Prozessen aus. Bei Kooperation ist eine explizite Synchronisation erforderlich.

Eigenschaften von Prozessen

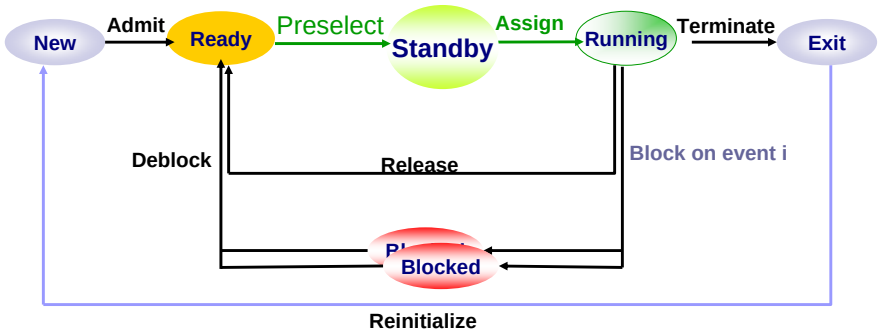
- **Programmcode**: Folge von Maschinenbefehlen (text section)
- **Interner Zustand**: Aktueller Zustand durch Programmzähler und Registerinhalte
- **Stack**: Inhalt des Stapelspeichers, wo temporäre Variablen und Parameter für Funktionsaufrufe verwaltet werden
- **Daten**: Inhalt des Speichers, in dem die globalen Daten gehalten werden
- **Externer Zustand**: Beziehung zu anderen Betriebsmitteln

Prozesszustände

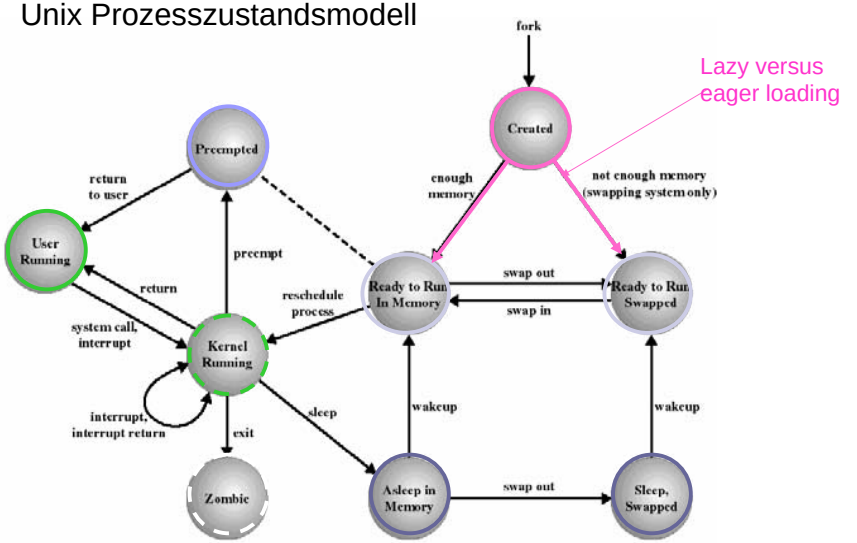
- Typische definierte Prozesszustände und Zustandsübergänge



Win-NT's Prozesszustandsmodell (mit Sieben Zuständen)



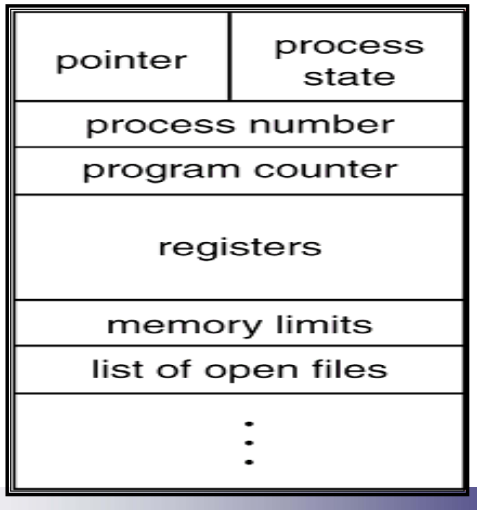
Unix Prozesszustandsmodell



Mögliche Attribute für einen Prozessleitblock (PCB)

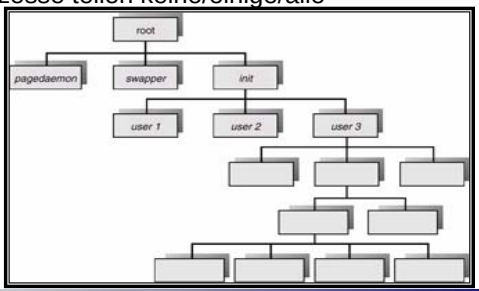
	Process management	Memory management	File management
Kontext	Registers Program counter Program status word Stack pointer	Pointer to text segment Pointer to data segment Pointer to stack segment	Root directory Working directory File descriptors User ID Group ID
Scheduling	Process state Priority Scheduling parameters		
Familie	Process ID Parent process Process group		
Zeit	Signals Time when process started CPU time used Children's CPU time Time of next alarm		

PCB Struktur



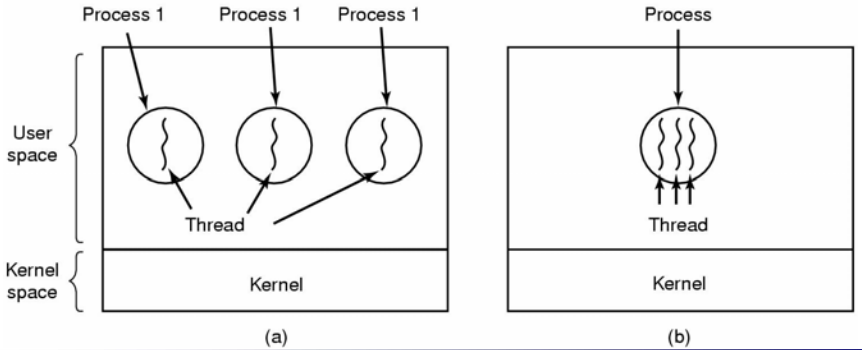
Prozessbäume

- Alle existierenden Prozesse sind in einer Prozesstabelle gespeichert
- Prozesse können neue Prozesse erzeugen, wodurch eine Hierarchie (Baum) von Prozessen entsteht
- Cascading termination möglich, falls erzeugte Prozesse nicht ohne erzeugenden Prozess existieren dürfen/sollen
- Mutterprozess und Kinderprozesse teilen keine/einige/alle Ressourcen

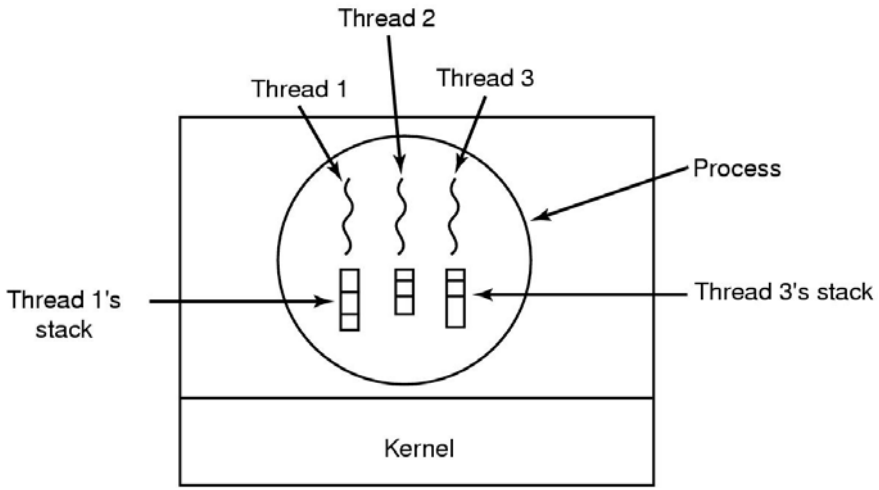


Leichtgewichtsprozesse (Threads)

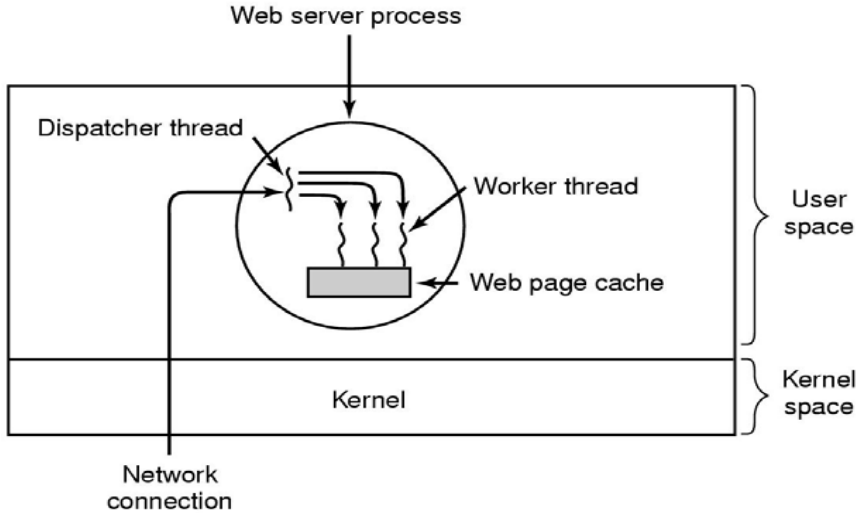
- Threads sind parallele Kontrollflüsse, die nicht gegeneinander abgeschottet sind
  - laufen innerhalb eines Adressraumes, innerhalb eines „echten“ Prozesses
  - teilen sich gemeinsame Ressourcen



Threads besitzen eigenen Stack



Thread Beispiel



Charakterisierung von Threads

- Pro Prozess
  - Adressraum
  - Globale Variablen
  - Offene Dateien
  - Kinderprozesse
  - Unerledigte Alarme
  - Signal und Signalkontroller
  - Informationen für Systemstatistiken
- Pro Thread
  - Programmzähler
  - Register
  - Stack
  - Zustand

Vorteile/Nachteile von Threads

- Kontextwechsel ist effizienter
  - kein Wechsel des Adressraumes
  - kein automatisches Scheduling (Kernelthread bei BS, Benutzerthread bei Anwendung)
  - kein Retten und Restaurieren des kompletten Kontextes (nur Programmzähler und Register)
- Pro Zeiteinheit sind viel mehr Threadwechsel als Prozesswechsel möglich -> Leichtgewichtsprozesse
- Gleichzeitige Aktivitäten können besser modelliert werden, z.B. falls einige Aktivitäten von Zeit zu Zeit blockieren/warten
- Bessere Performance bei Erzeugung/Zerstörung und bei Mischung mit I/O intensiven Aufgaben (kein Vorteil bei reiner CPU-Nutzung)
- Nachteile
  - Schutzfunktionen fallen weg (z.B. getrennte Adressräume)
  - Synchronisation erforderlich

Prozessverwaltung

- Prozesse und Threads
- **Prozess-Scheduling**
- Interprozesskommunikation
- Verklemmungen

Prozesswechsel

- Mehrere Prozesse teilen sich einen Prozessor, weshalb Prozesswechsel notwendig sind
- Das Betriebssystem entscheidet über die Prozesswechsel
- Komponenten des Scheduling
  - Prozesswechselkosten
    - Prozesswechsel sind relativ teuer wegen Sicherung des Kontextes
  - Warteschlangenmodelle
    - Wartende Prozesse werden in internen Warteschlangen gehalten
    - Auswahlstrategie der Warteschlangen haben wesentlichen Einfluss auf Systemverhalten
  - Scheduling-Verfahren

Prozess-Scheduling (1/2)

- Anforderungen
  - Fairness
  - Effizienz
  - Antwortzeit
  - Verweilzeit
  - Durchsatz
- Entscheidungspunkte
  - Erzeugung eines neuen Prozesses
  - Prozess terminiert oder blockiert
  - I/O-Unterbrechungen (Interrupts)
  - Zeitscheibe läuft ab
  - Verfahren:
    - nicht-präemptiv: laufender Prozess wird nicht von außen unterbrochen
    - präemptiv: laufende Prozesse können von außen unterbrochen werden

Prozess-Scheduling (2/2)

- Deterministische und probabilistisches Scheduling
- Verfahren hängt von gewünschten Eigenschaften ab
  - Alle Systeme
    - Fairness
    - Effizienz (Nutzung der Ressourcen)
    - Umsetzung der gewünschten Policy
  - Batch-Systeme
    - Maximierung des Durchsatzes (Jobs/Zeit)
    - Maximierung der einzelnen Laufzeiten
    - Maximierung der CPU-Nutzung
  - Interaktive Systeme
    - Minimierung der Antwortzeit
  - Realzeit-Systeme
    - Einhalten von Deadlines, Vermeidung von Datenverlusten
    - Vermeidung von Qualitätsverlusten in Multimedia-Systemen

Scheduling-Verfahren

- Batch:
  - First-Come First Served (FCFS)
  - Shortest Job First (SJF)
  - Shortest Remaining Time Next (SRTN)
- Interaktiv:
  - Round-Robin
  - Priority Scheduling
  - Shortest Process Next
- Echtzeit:
  - Earliest Deadline First (EDF)

Prozessverwaltung

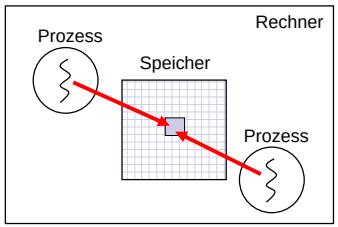
- Prozesse und Threads
- Prozess-Scheduling
- **Interprozesskommunikation**
- Verklemmungen

Interprozesskommunikation (IPC)

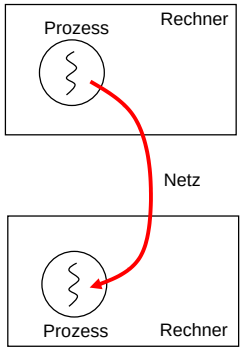
- Prozesse arbeiten oft nicht allein, sondern müssen Informationen austauschen, um eine gemeinsame Aufgabe zu erfüllen.
- Beim diesem Austausch müssen drei wichtige Fragen beantwortet werden:
  - Wie werden die Daten ausgetauscht?
    - Über gemeinsame Variablen?
    - Über Nachrichtenaustausch?
  - Wie wird sicher gestellt, dass die Prozesse nicht gleichzeitig auf gemeinsame Information zugreifen?
  - Wie wird die richtige Reihenfolge des Zugriffs sicher gestellt (Producer-Consumer-Problem)?
- Die beiden letzten Fragen beschreiben das **Synchronisationsproblem**.

Kommunikationsformen

- Gemeinsame Variablen: vor allem in Ein-Prozessor und Multiprozessor-Systemen mit gemeinsamem physikalischen Speicher



- Nachrichtenaustausch: vor allem bei verteilten Systemen, also Kommunikation über Rechnergrenzen hinweg



Erzeuger/Verbraucher-Problem

- Problemstellung**:**
  - Zwei Prozesse besitzen einen gemeinsamen Puffer mit einer festen Länge (bounded buffer). Eine Prozess schreibt Informationen in den Puffer (producer), der andere liest Informationen aus dem Puffer (consumer).
  - Der Erzeuger darf nicht in den vollen Puffer einfügen.
  - Der Verbraucher darf nicht aus dem leeren Puffer lesen.
- Eine fehlerhafte Lösung:

```
while (true) {                    while (true) {
   produce(&item);                   while (count == 0) sleep(1);
   while (count == N) sleep(1);      item = buffer[out];
   buffer[in] := item;               out := (out + 1) % N;
   in := (in + 1) % N;               count := count - 1;
   count := count + 1;               consume(item);
}                                 }
```

Sychronisationsproblem

- Die Anweisungen
  `count := count + 1` und `count := count - 1`
  werden typischerweise zu den folgenden Maschinenbefehlen:

```
P1: register1 := count          C1: register2 := count
P2: register1 := register1+1    C2: register2 := register2-1
P3: count     := register1      C3: count     := register2
```

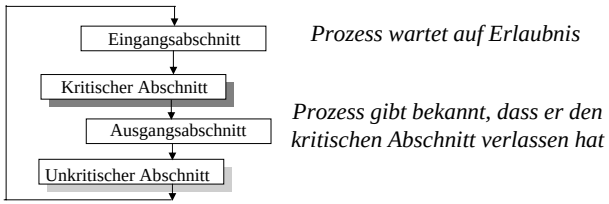
- Nehmen wir an, der Wert von `count` sei 5. Was liefert die Ausführung der Befehle in der Reihenfolge
  - (a) P_1, P_2, C_1, C_2, P_3, C_3 und die Ausführung in der Reihenfolge
  - (b) P_1, P_2, C_1, C_2, C_3, P_3?

Race Conditions

- (a) liefert den falschen Wert 4,
  (b) liefert den falschen Wert 6.
  Diese Werte sind falsch, da ja ein Element eingefügt und eines entfernt wird, der Wert müsste also bei 5 bleiben.
- Die angegebene Lösung erzeugt falsche Ergebnisse, die von der Bearbeitungsreihenfolge der Prozesse abhängen.
- Jede Situation, in der mehrere Prozesse gemeinsame Daten manipulieren, kann zu derartigen Synchronisationsproblemen (race conditions) führen. *Synchronisationsverfahren* garantieren, dass immer nur ein Prozess zu einem bestimmten Zeitpunkt gemeinsam benutzte Daten manipulieren kann.

Kritischer Abschnitt (1/2)

- Ein kritischer Abschnitt (critical section) eines Programms ist eine Menge von Instruktionen, in der das Ergebnis der Ausführung auf unvorhergesehene Weise variieren kann, wenn Variablen, die auch für andere parallel ablaufende Prozesse oder Threads zugreifbar sind, während der Ausführung verändert werden.
- Prinzipieller „Lebenszyklus“ eines Prozesses oder Threads:



Kritischer Abschnitt (2/2)

- Das Problem besteht darin, ein „Protokoll“ zu entwerfen, an das sich alle Prozesse oder Threads halten und das die Semantik des kritischen Abschnitts realisiert.
- Anforderungen an eine Lösung:
  - Zwei Prozesse dürfen nicht gleichzeitig in ihrem kritischen Abschnitt sein (safety).
  - Es dürfen keine Annahmen über die Bearbeitungsgeschwindigkeit von Prozessen gemacht werden.
  - Kein Prozess, der außerhalb eines kritischen Bereichs ist, darf andere Prozesse beim Eintritt in den kritischen Abschnitt behindern.
  - Kein Prozess darf ewig auf den Eintritt in den kritischen Abschnitt warten müssen (fairness).
  - Möglichst passives statt aktives Warten, da aktives Warten einerseits Rechenzeit verschwendet und andererseits Blockierungen auftreten können, wenn auf Prozesse/Threads mit niedriger Priorität gewartet werden muss.

Lösungen für die Synchronisation

- Es wurden eine Reihe von Lösungen für die Synchronisation von Prozessen entwickelt, von denen wir die wichtigsten besprechen:
  - Semaphore
  - Mutexe
  - Monitore
- Dies sind Lösungen für die Synchronisation bei Nutzung gemeinsamer Variablen. Bei Nachrichtenkommunikation wird diese Form der Synchronisation nicht benötigt.

Semaphore

- Ein Semaphor ist eine geschützte Variable, auf die nur die **unteilbaren (atomaren)** Operationen up (signal, V) und down (wait, P) ausgeführt werden können:

```
down(s)
{   s := s - 1;
    if (s < 0) queue_this_process_and_block();
}

up(s)
{   s := s + 1;
    if (s >= 0) wakeup_process_from_queue();
}
```


Eigenschaften von Semaphoren & Mutexe

- Semaphore
  - Semaphore können zählen und damit z.B. die Nutzung gemeinsamer Betriebsmittel überwachen.
  - Semaphore werden durch spezielle Systemaufrufe implementiert, die die geforderten **atomaren** Operationen up und down realisieren.
  - Semaphore können in beliebigen Programmiersprachen benutzt werden, da sie letztlich einem Systemaufruf entsprechen.
  - Semaphore realisieren ein passives Warten bis zum Eintritt in den kritischen Abschnitt.
- Mutexe
  - Oft wird die **Fähigkeit zu zählen** bei Semaphoren nicht benötigt, d.h., es genügt eine einfache binäre Aussage, ob ein kritischer Abschnitt frei ist oder nicht.
  - Dazu kann eine einfacher zu implementierende Variante, der sogenannte **Mutex** (von „mutual exclusion“), verwendet werden.

Erzeuger/Verbraucher mit Semaphoren

- Das Erzeuger/Verbraucher Problem lässt sich elegant mit drei Semaphoren lösen:
  1. Ein Semaphor zum Betreten der kritischen Abschnitte (mutex).
  2. Ein Semaphor, das die freien Plätze im Puffer herunter zählt und den Prozess blockiert, der in einen vollen Puffer schreiben will (empty).
  3. Ein Semaphor, das die belegten Plätze im Puffer herauf zählt und den Prozeß blockiert, der von einem leeren Puffer lesen will (full).

```
while (true) {
   produce(&item);
   down(&empty);
   down(&mutex);
   add(&item);
   up(&mutex);
   up(&full);
}
```

```
semaphore mutex = 1,
          empty = N,
           full = 0;
```

```
while (true) {
   down(&full);
   down(&mutex);
   remove(&item);
   up(&mutex);
   up(&empty);
   consume(item);
}
```


Implementierung von Semaphoren

- Semaphore lassen sich als Systemaufrufe implementieren, wobei kurzzeitig sämtliche Unterbrechungen unterbunden werden. Da zur Implementation nur wenige Maschinenbefehle benötigt werden, ist diese Möglichkeit akzeptabel.
- Auf Mehrprozessor-Systemen muss ein Semaphor mit einer unteilbaren Prozessor-Operation implementiert werden, die das Semaphor vor gleichzeitigen Änderungen in anderen Prozessoren schützt.
- Beispiel: **Test-And-Set-Lock** (TSL): beim Ausführen der Operation wird der Memory-Bus für alle anderen Operationen gesperrt

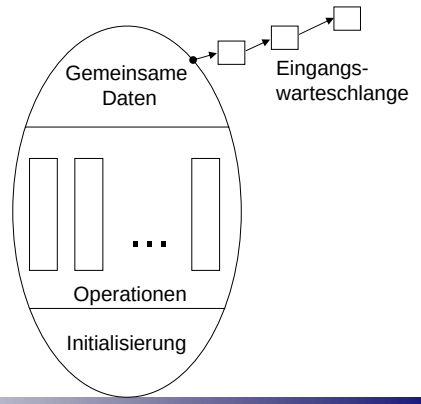
Probleme bei Semaphoren

- Programmierfehler bei der Benutzung eines Semaphors können zu Verklemmungen oder inkorrekten Ergebnissen führen. Typische Fehler:
  - Sprünge aus kritischen Bereichen, ohne das mutex-Semaphor freizugeben.
  - Sprünge in kritische Bereiche, ohne das mutex Semaphor zu setzen.
  - Vertauschungen von Semaphoren zum Schutz von kritischen Abschnitten und Semaphoren, die vorhandene Betriebsmittel zählen.
- Alles in allem sind Semaphore eine „low-level"-Lösung, die erhebliche Disziplin vom Programmierer verlangt. Eine komfortablere Lösung bieten *Monitore*.

Monitore

- Ein Monitor ist eine Sammlung von Prozeduren, Variablen und Datenstrukturen, die in einem Modul gekapselt sind.
- Prozesse können die Prozeduren des Monitors aufrufen, aber keine internen Daten ändern.
- Monitore besitzen die Eigenschaft, dass immer nur genau ein Prozess im Monitor aktiv sein kann.
- Monitore sind Konstrukte einer Programmiersprache und erfordern daher spezielle Compiler.
- Es ist die Aufgabe des Compilers, Maschinenbefehle zu generieren, die den wechselseitigen Ausschluss im Monitor garantieren.

Schematischer Aufbau eines Monitors:



Bedingungsvariablen eines Monitors

- Bedingungsvariablen (condition variables) eines Monitors mit den zugehörigen Operationen `wait()` und `signal()` erlauben es, im Monitor auf andere Prozesse zu warten:
  - `wait(c)`: Der aufrufende Prozess blockiert, bis ein `signal()` auf der Bedingungsvariablen c ausgeführt wird. Ein anderer Prozess darf den Monitor betreten.
  - `signal(c)`: Ein auf die Bedingungsvariable c wartender Prozeß wird aufgeweckt. Der aktuelle Prozess muss den Monitor sofort verlassen.
- Der durch `signal()` aufgeweckte Prozess wird zum aktiven Prozess im Monitor, während der Prozess, der `signal()` ausgeführt hat, blockiert.
- Bedingungsvariablen sind keine Zähler. Ein `signal(c)` auf einer Variablen c ohne ein `wait(c)` geht einfach verloren.

Erzeuger/Verbraucher-Problem mit einem Monitor

```
monitor ProducerConsumer
  condition full, empty
  integer count;

  procedure enter
    if count = N  then wait(full);
    enter_item()
    count := count + 1;
    if count = 1  then signal(empty);
  end;

  procedure remove
    if count = 0 then wait(empty);
    remove_item();
    count := count - 1;
    if count = N-1 then signal(full);
  end;

  count := 0;
end monitor;
```

```
procedure producer
   while (true) do begin
        produce_item;
        ProducerConsumer.enter;
   end
end;
```

```
procedure consumer
   while (true) do begin
        ProducerConsumer.remove;
        consume_item;
   end
end;
```

Kritische Abschnitte mit Compilerunterstützung in Java

- In Java können kritische Abschnitte als Anweisungsfolge geschrieben werden, denen das Schlüsselwort `synchronized` voran gestellt wird.
- Die kritischen Abschnitte schließen sich bzgl. des Sperrobjekts gegenseitig aus.

```
class Buffer {
  private const int size = 8;
  private int count = 0, out = 0, in =
   0;
  private int[] pool = new int[size];

  public synchronized void insert(int i)
   {
    pool[in] = i;
    in = (in + 1) % size;    count++;
  }

  public sychronized int remove() {
    int res = pool[out];
    out = (out + 1) % size;  count--;
    return res;
  }

  public synchronized int cardinal() {
    return count;
  }
}
```


Synchronisation in Windows

- Verfügbare Mechanismen
  - Semaphoren
  - Mutexe
  - Kritische Sektionen
  - Ereignisse
- Synchronisation findet auf Thread-Ebene statt (andere Threads in einem Prozess sind nicht betroffen)

Interprozesskommunikation in Windows

- Es stehen verschiedene Mechanismen zur Verfügung:
  - Pipes, Named Pipes (Kommunikation auf einem Rechner)
  - Mailslots (ähnlich Pipes, mit leicht anderen Eigenschaften)
  - Sockets (Kommunikation zwischen Rechnern)
  - Remote Procedure Calls
  - Shared Files

Prozessverwaltung

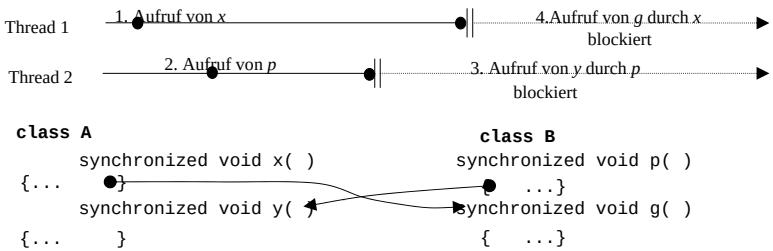
- Prozesse und Threads
- Prozess-Scheduling
- Interprozesskommunikation
- **Verklemmungen**

Verklemmungen/Deadlocks

- Prozesse benötigen Betriebsmittel, meist sogar mehrere
  - Drucker
  - Festplatte
  - Speicher (z.B. in internen BS-Tabellen)
- Was passiert wenn sich zwei Prozesse jeweils ein Betriebsmittel reservieren, das der andere auch benötigt?
  - Diese Situation wird als Deadlock bezeichnet
- Definition:
  Eine Menge von Prozessen befindet sich in einer Verklemmung (deadlock), wenn jeder Prozess der Menge auf ein Ereignis wartet, dass nur ein anderer Prozess aus der Menge auslösen kann.

Deadlock – Illustration/Beispiel

(a) Ein potenzieller deadlock. (b) Ein tatsächlicher deadlock.



Ressourcen und deren Nutzung

- Zwei Typen von Ressourcen
  - preemptable: vorzeitige Rückgabe möglich (z.B. Speicher)
  - non-preemptable: vorzeitige Rückgabe ist NICHT möglich (z.B. DVD, Drucker)
- Zuweisung, Nutzen
  - von BS oder selbst verwaltet
  - Beispiel für Selbstverwaltung: gemeinsame Variablen
  - Bei der Selbstverwaltung sind Deadlocks am häufigsten

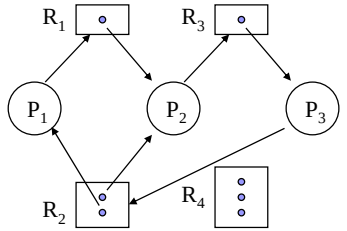
Notwendige Bedingungen für eine Verklemmung

1. Wechselseitiger Ausschluss (mutual exclusion):
   - Ein Betriebsmittel ist entweder genau einem Prozess zugeordnet oder es ist verfügbar.
2. Wartebedingung (hold and wait):
   - Es gibt einen Prozess, der ein Betriebsmittel belegt und auf ein anderes Betriebsmittel wartet, das von einem anderen Prozess belegt wird.
3. Keine Verdrängung (no preemption):
   - Einem Prozess kann ein Betriebsmittel nicht entzogen werden.
4. Zirkuläres Warten (circular wait):
   - Es gibt eine Menge {P1, P2,..., Pn} von Prozessen, so dass P1 auf ein Betriebsmittel wartet das P2 belegt, P2 wartet auf ein Betriebsmittel das P3 belegt, ..., und Pn wartet auf ein Betriebsmittel das P1 belegt.

Betriebsmittel-Zuweisungsgraph

- Ein Betriebsmittel-Zuweisungsgraph ist ein gerichteter Graph, der zur Beschreibung von Verklemmungen verwendet wird:
  - Der Graph besteht aus einer Menge von Prozessen P={P_1, P_2,..., P_n}, einer Menge von Betriebsmitteln R={R_1, R_2,..., R_m} und gerichteten Kanten.
  - Eine gerichtete Kante von einem Prozess P_i zu einem Betriebsmittel R_j beschreibt, dass der Prozess P_i ein Exemplar der Betriebsmittels R_j angefordert hat (request edge).
  - Eine gerichtete Kante von einem Betriebsmittel R_j zu einem Prozess P_i beschreibt, dass ein Exemplar des Betriebsmittels R_j dem Prozess P_i zugewiesen ist (assignement edge).
- Ein Zyklus im Graph bedeutet das Vorhandensein einer Verklemmung.

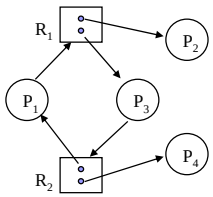
Beispiel



- P1 hat R1angefordert; R1 ist jedoch schon P2 zugeordnet.
- P2 wartet auf R3, die aber schon P3 zugewiesen ist.
- P3 wartet auf R2. R2 ist zweimal vorhanden, aber beide Instanzen sind bereits P1 bzw. P2 zugewiesen.
- ➔ Verklemmung

Eigenschaften von Zuweisungsgraphen

- Enthält ein Betriebsmittel-Zuweisungsgraph keine Zyklen, dann existiert auch keine Verklemmung.
- Besitzt ein Betriebsmittel-Zuweisungsgraph einen Zyklus und existiert von jedem beteiligten Betriebsmittel nur genau ein Exemplar, dann existiert eine Verklemmung.
- Besitzt ein Betriebsmittel-Zuweisungsgraph einen Zyklus und von den beteiligten Betriebsmitteln existieren mehrere Exemplare, so ist eine Verklemmung möglich, aber nicht unbedingt auch eingetreten.



Der Zyklus P_1, R_1, P_3, R_2, P_1 beschreibt keine Verklemmung, da Prozess P_4 beendet werden kann, womit ein Exemplar von R_2 wieder verfügbar wird.

Behandlung von Deadlocks

- Dem Deadlock-Problem kann mit einer von vier Strategien begegnet werden:

1. Ignorieren: meist keine gute Idee ...
2. Deadlock-Entdeckung und –Auflösung: lasse Deadlocks passieren und behandle sie dann
3. Deadlock-Vermeidung durch vorsichtige dynamische Ressourcen-Allokation
4. Strukturelle Deadlock-Verhinderung durch das Negieren einer der vier notwendigen Bedingungen

Verhinderung von Verklemmungen (1/4)

- Wird eine der vier notwendigen Bedingungen für das Entstehen von Verklemmungen negiert, so können keine Verklemmungen mehr entstehen.

1. **Verhinderung von wechselseitigem Ausschluss:**
   - Auf alle Betriebsmittel kann von mehreren Prozessen aus gleichzeitig zugegriffen werden.
   - Beispiel: Drucker
     Anstatt einen Drucker Prozessen exklusiv zuzuordnen, werden Druckausgaben in Dateien abgelegt und in eine Warteschlange eingefügt. Ein spezieller Prozess (printer daemon) erhält exklusiven Zugriff auf den Drucker und arbeitet die Warteschlange ab. Dieser Prozess fordert selbst keine weiteren Betriebsmittel an.
   - Problem:
     Nicht alle Betriebsmittel (z.B. Speicher, Einträge in der Prozesstabelle) können zwischen Prozessen geteilt werden. Im Beispiel kann der Plattenplatz zur Ablage von Druckausgaben selbst als Betriebsmittel betrachtet werden, das Auslöser für eine Verklemmung ist.

Verhinderung von Verklemmungen (2/4)

2. **Verhinderung der Wartebedingung:**
   - Jeder Prozess darf nur dann Betriebsmittel anfordern, wenn er selbst keine anderen Betriebsmittel belegt.
   - Alternative 1:
     - Jeder Prozess fordert sämtliche Betriebsmittel an, bevor seine Bearbeitung beginnt.
     - Problem: Geringe Effizienz, da alle Betriebsmittel eines Prozesses während seiner Ausführung belegt sind. Die meisten Prozesse kennen ihre Betriebsmittelanforderungen nicht, bevor sie starten.
   - Alternative 2:
     - Ein Prozess muss alle Betriebsmittel abgeben, bevor er weitere anfordern kann.
     - Problem: Es ist einem Prozess nicht immer möglich, alle Betriebsmittel freizugeben, bevor er weitere Betriebsmittel belegt (z.B. der Eintrag in der Prozesstabelle). Außerdem kann diese Methode dazu führen, dass die Bearbeitung eines Prozesses unendlich verzögert wird, da ein benötigtes Betriebsmittel immer von einem anderen Prozess belegt ist (starvation).

Verhinderung von Verklemmungen (3/4)

3. **Entzug von zugewiesenen Betriebsmitteln:**
   - Bereits belegte Betriebsmittel können einem Prozess entzogen werden.
   - Beispiel:
     - Beispielsweise können einem Prozess, der bereits auf ein Betriebsmittel wartet, seine bereits belegten Betriebsmittel entzogen werden, um Betriebsmittelanforderungen anderer Prozesse befriedigen zu können. Die entzogenen Betriebsmittel werden zu der Liste der Betriebsmittel hinzugefügt, auf die der Prozess wartet.
   - Probleme:
     - Normalerweise besitzen die zugewiesenen Betriebsmittel einen Zustand, der beim Entzug gesichert und später wieder restauriert werden muss. Nicht jedes Betriebsmittel (z.B. Drucker) erlaubt es, den Zustand zu sichern und später wieder zu restaurieren.
   - Verwendung:
     - Das Verfahren findet häufig Anwendung bei Betriebsmitteln, deren Zustand leicht gesichert werden kann, wie z.B. CPU-Registerinhalte oder Hauptspeicherbereiche.

Verhinderung von Verklemmungen (4/4)

4. **Verhinderung von zirkulärem Warten:**
   - Es wird eine totale Ordnung auf den vorhandenen Betriebsmitteln definiert.
   - Ein neues Betriebsmittel darf nur dann angefordert werden, wenn das Betriebsmittel bezüglich der Ordnung größer ist als alle bereits belegten Betriebsmittel eines Prozesses.
   - Mehrere Exemplare eines Betriebsmittels müssen in einer Anfrage angefordert werden.
   - Probleme:
     - Es ist schwierig, eine totale Ordnung für Betriebsmittel zu definieren, die allen Einsatzmöglichkeiten eines Betriebssystems gerecht wird.
     - Benötigt ein Prozess ein Betriebsmittel mit geringerer Ordnung, so müssen zunächst sämtliche Betriebsmittel freigegeben werden.

Vermeidung von Verklemmungen

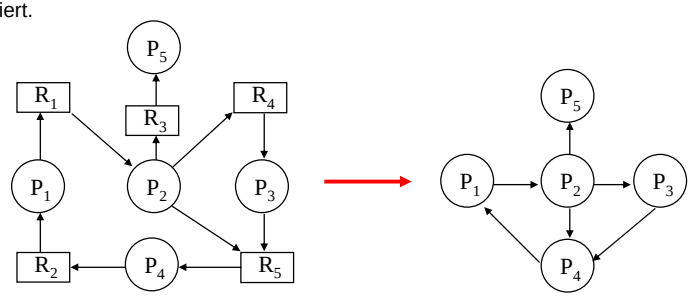
- Ansatz:
  - Anhand von zusätzlichen Informationen werden nur die Betriebsmittelanforderungen gewährt, die nicht zu einer Verklemmung führen können.
  - Im Vergleich zur Verhinderung werden Betriebsmittel effizienter genutzt und der Systemdurchsatz erhöht.
  - Annahme: Die maximale Anforderung von Betriebsmitteln ist a-priori bekannt.
- Sichere Zustände:
  - Ein System ist in einem sicheren Zustand, wenn es jedem Prozess seine maximale Betriebsmittelanforderung gewähren kann, ohne dass das System in eine Verklemmung geraten kann.
- Unsichere Zustände:
  - Es existiert die Möglichkeit einer Verklemmung.

Deadlock-Entdeckung und Beseitigung

- Erkennungsverfahren (detection algorithm):
  - Das Betriebssystem überprüft periodisch, ob eine Verklemmung vorliegt.
- Behebungsverfahren (recovery algorithm):
  - Im Fall einer Verklemmung ergreift das Betriebssystem Maßnahmen, um die Verklemmung aufzulösen.
- Notwendige Randbedingungen:
  - Die notwendigen Informationen über belegte und angeforderte Betriebsmittel muss einfach zugänglich sein.
  - Der Aufwand zur Entdeckung von Verklemmungen muss vertretbar sein. (Man beachte, dass während der Ausführung des Erkennungsverfahrens keine Betriebsmittel angefordert oder freigegeben werden dürfen.)
  - Die Kosten zur Behebung von Verklemmungen müssen vertretbar sein.

Erkennung von Verklemmungen (1/2)

- Es existiert nicht mehr als ein Exemplar von jedem Betriebsmittel:
  - Aus dem Betriebsmittel-Zuweisungsgraphen wird ein Wartegraph (wait-for graph) konstruiert, wobei alle Knoten, die Betriebsmittel repräsentieren, entfernt werden.
  - Eine Kante vom Prozess P_i zum Prozess P_j existiert im Wartegraph genau dann, wenn der Betriebsmittel-Zuweisungsgraph zwei Kanten $P_i R_q$ und $R_q P_j$ besitzt.
  - Eine Verklemmung existiert genau dann, wenn ein Zyklus im Wartegraph existiert.



Erkennung von Verklemmungen (2/2)

- Es existieren mehrere Exemplare von jedem Betriebsmittel:
  - Verklemmungen lassen sich erkennen, indem man versucht, eine Abarbeitungsfolge der Prozesse $P_1,\ldots, P_n$ zu finden, so dass alle bekannten Betriebsmittelanforderungen erfüllt werden können.
  - Dafür kann z.B. der Bankers-Algorithmus verwendet werden.

Beseitigung von Verklemmungen

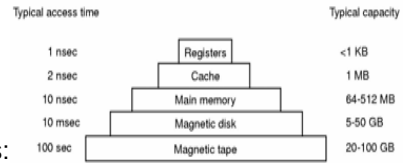
- Zwangsweise Beendigung von Prozessen (process termination):
  - Einfach zu implementieren und sehr effektiv.
  - Auswahl der zu beendenden Prozesse schwierig.
  - Zwangsweise Beendigung von Prozessen kann Inkonsistenzen erzeugen.
  - Bereits verbrauchte Rechenzeit ist normalerweise verloren.
- Zwangsweiser Entzug von Betriebsmitteln (resource preemption):
  - Betriebsmittel werden zwangsweise einem Prozess entzogen, um damit die Verklemmung aufzuheben.
  - Auswahl des Prozesses, dem Betriebsmittel entzogen werden, ist schwierig.
  - Nicht jedes Betriebsmittel (z.B. Prozesstabelleneintrag) kann entzogen werden.
- Rücksetzen von Prozessen (rollback of processes):
  - In speziellen Fällen können Prozesse auf einen vorher gesicherten Zustand (checkpoint) zurückgesetzt werden.
  - Insbesondere Datenbank-Prozesse verwalten häufig ein Logbuch über durchgeführte Transaktionen, so dass ein Prozess ohne Datenverlust gerade soweit zurückgesetzt werden kann, wie zur Behebung der Verklemmung notwendig.

Speicherverwaltung

- Einführung
- Swapping
- Virtual Memory
- Seitenersetzungsstrategien
- Segmentierung

Einführung

- Verschiedene Arten von Speichern, hierarchisch organisiert:
  - Cache-Speicher
  - Hauptspeicher
  - Sekundärspeicher
  - Archiv-Speicher
- Eigenschaften des Hauptspeichers:
  - Der Hauptspeicher besteht aus einer Menge von Wörtern oder Bytes, die jeweils über eine eigene Adresse verfügen.
  - Sowohl die CPU als auch E/A-Geräte greifen auf den Hauptspeicher zu.
  - Ausführbare Programme befinden sich zumindest teilweise im Hauptspeicher.
  - Die CPU kann normalerweise nur auf Daten im Hauptspeicher direkt zugreifen



Speicher und dessen Verwaltung

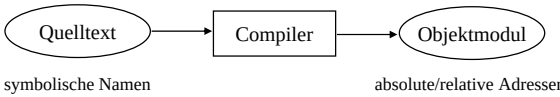
- Betriebssystemteil verantwortlich für Speichermanagement: *Memory Manager*
- Aufgaben
  - Buchhaltung: welche Speicherbereiche werden benutzt, welche sind frei
  - Speichervergabe und -rücknahme an/von Prozessen
  - Datenverschiebung zwischen den Speicherhierarchien

Grundlegende Speicherverwaltung

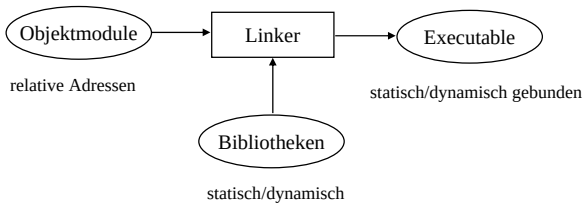
- Speichermanagement: grundsätzlich zwei Klassen:
  - Verschieben von Prozessen vom Hauptspeicher auf Festplatte und zurück (Swapping, Paging)
  - Oder nicht (einfache Variante)
- Bei Verzicht auf Swapping und Paging:
  - Monoprogramming:
    - immer nur ein Prozess sowie das OS im Speicher
    - Einsatzgebiet: frühe Batchsysteme, eingebettete Systeme
  - Multiprogramming mit festen Partitionen
    - Speicher wird in feste Blöcke eingeteilt, Programme bekommen einen Speicherbereich zugewiesen
    - Einsatz im OS/360 von IBM
    - Oft wurde die Größe der Partitionen einmal am Tag festgesetzt

Abbildungen von Speicheradressen

- Ein Compiler/Assembler übersetzt symbolische Adressen (Namen von Variablen und Funktionen) in absolute oder relative Speicheradressen.

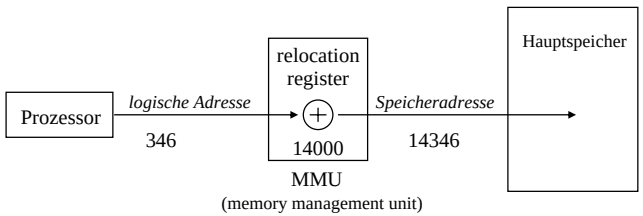


- Ein Linker bindet mehrere Objektmodule mit relativen Adressen und die benötigten Bibliotheken zu einem ausführbaren Programm (executable).



Präzisierung der Aufgaben

- Bereitstellung und Zuweisung des Speicherplatzes an die Prozesse (allocation).
- Einrichtung und Koordination von Speicherbereichen, die von mehreren Prozessen gemeinsam benutzt werden können (shared memory).
- Schutz der Informationen im Hauptspeicher vor fehlerhaften oder unbefugten Zugriffen.
- Abbildung von logischen Adressen auf physikalische Adressen (address translation).



Moderne Speicherverwaltung

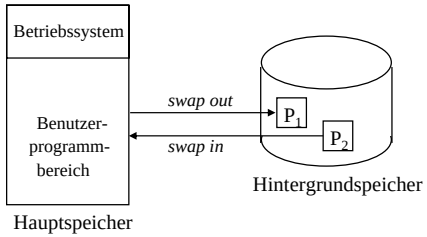
- Heutige Computer haben andere Anforderungen an die Verwaltung des Speichers
- Insbesondere
  - Laufen meist viele Prozesse
  - Haben die Prozesse oft mehr Speicherbedarf als physikalischer Speicher vorhanden ist
- Zwei wichtige Lösungen:
  - **Swapping:** Verschieben von Prozessen zwischen Hauptspeicher und Platte
  - **Virtual Memory**: Prozesse sind nur zum Teil im Hauptspeicher

Speicherverwaltung

- Einführung
- **Swapping**
- Virtual Memory
- Seitenersetzungsstrategien
- Segmentierung

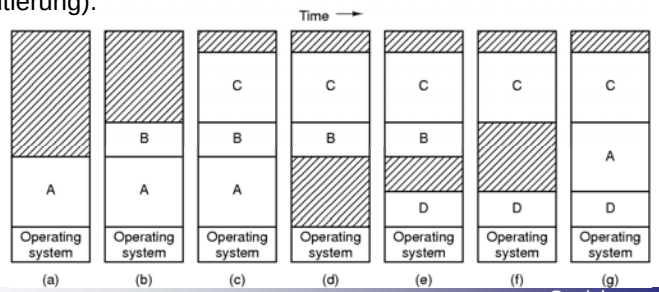
Prinzip des Swapping

- Der komplette Adressraum eines Prozesses wird beim Prozesswechsel auf den Hintergrundspeicher ausgelagert und ein anderer Adressraum eingelagert.
- Ist im Betriebssystem ohne weitere Hardware-Unterstützung zu realisieren.
- Extrem aufwändige Prozesswechsel, da die Zugriffszeiten auf den Hintergrundspeicher im allgemeinen um Größenordnungen langsamer sind als Zugriffe auf den Hauptspeicher.
- Wurde von MS Windows 3.* benutzt, um Prozesse auszulagern.
- Wird bei UNIX-Systemen benutzt, um bei einer Überbelegung des Hauptspeichers einigen Prozessen das Betriebsmittel Hauptspeicher zwangsweise zu entziehen.



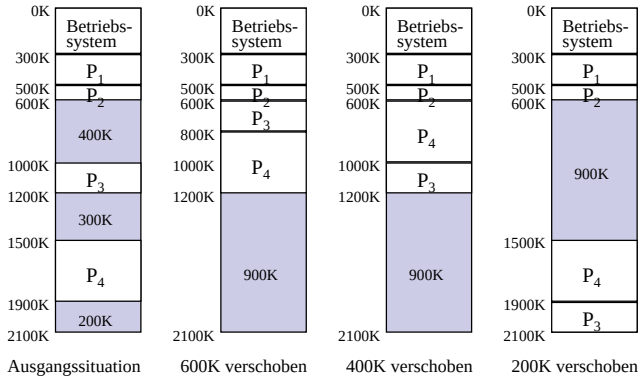
Speichersegmente und Fragmentierung

- Der Hauptspeicher wird vom Betriebssystem in Segmente variabler Länge eingeteilt, die den Prozessen zugewiesen werden. Zur Verwaltung dienen Segmenttabellen.
- Segmente können verschiedene Zugriffsrechte besitzen, zwischen Prozessen geteilt werden, oder bei Bedarf wachsen.
- Durch das Entfernen und Einfügen von Segmenten entstehen langristig kleine unbenutzte Speicherbereiche (externe Fragmentierung).
- Beispiel:



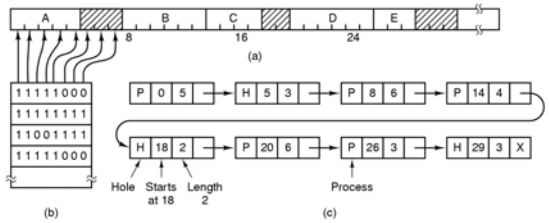
Kompaktifizierung

- Durch das Verschieben von Segmenten im Speicher können viele kleine Löcher zu einem großen Stück freien Speichers zusammengefügt werden (Kompaktifizierung, compaction).
- Kompaktifizierung setzt voraus, dass die Adressen dynamisch abgebildet werden.
- Die Suche nach einer optimalen Kompaktifizierungsstrategie ist schwierig.
- Kompaktif. benötigt viel CPU-Zeit.



Speicherbuchhaltung

- Wie merkt sich der Memory Manager, welche Speicherbereiche frei bzw. belegt sind?
- Zwei Lösungen: Bitmaps oder verkettete Listen
- Beispiel:
- Jedes Bit identifiziert einen kleinen Speicherbereich, daher feste Größe.
- Listen vereinfachen die dynamische Verwaltung.
- Wichtige Frage: Wie finde ich das passende Segment, wenn ein neuer Prozess Speicher anfordert?



Positionierungsstrategien

- **best fit:** Auswahl des kleinsten Loches, das das Segment aufnehmen kann. Diese Strategie lässt einerseits große Löcher lange bestehen, während sie andererseits eine Vielzahl kleiner und nutzloser Überreste erzeugt.
- **worst fit:** Auswahl des jeweils größten Loches. Dieses Verfahren tendiert dazu, alle Löcher auf etwa die gleiche Länge zu bringen, die dann aber eventuell zu klein zur Aufnahme eines bestimmten Segments sein kann.
- **first fit:** Auswahl des ersten hinreichend großen Loches. Dieses Verfahren liegt in seinem Verhalten zwischen den beiden anderen und ist sehr effizient.
- **next fit:** Dieses Verfahren ist eine Variation von first fit. Um zu verhindern, dass sich Löcher einer bestimmten Größe an einer Stelle des Speichers häufen, beginnt jede Suche am Ende der vorherigen Suche. Der Speicher wird also ringförmig durchsucht.
- **buddy system:** Die Löcher werden in *k* Listen so einsortiert, dass die *i*-te Liste jeweils Löcher der Länge größer gleich 2^i für *i=1,...,k* enthält. Dabei können zwei benachbarte Löcher der *i*-ten Liste effizient zu einem Loch der *i+1*-ten Liste zusammengefügt werden. Umgekehrt kann ein Loch der *i*-ten Liste einfach in zwei Löcher der *i-1*-ten Liste aufgeteilt werden.

Speicherverwaltung

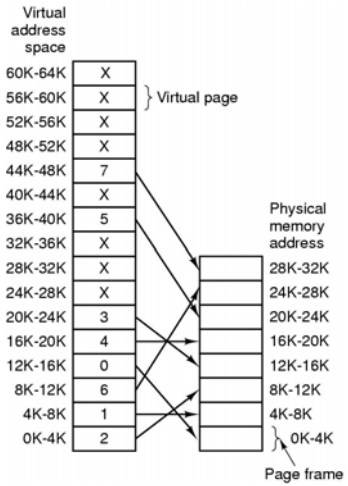
- Einführung
- Swapping
- **Virtual Memory**
- Seitenersetzungsstrategien
- Segmentierung

Virtual Memory

- Idee (Fotheringham, 1961): ist ein Programm größer als der zur Verfügung stehende Hauptspeicher, dann halte immer nur die aktuell notwendigen Teile im Speicher; lade andere Teile bei Bedarf nach
- Wichtige Fragen:
  - Welche Teile sind notwendig? Welche Teile behalte ich tunlichst im Speicher? → Lade- und Ersetzungsstrategien
- *Zweistufiges* Adressensystem: *virtuelle* Adressen, die die Programme benutzen, werden von der *Memory Management Unit* in *physikalische* Adressen umgewandelt und dann erst an den Speicher gegeben
- Wichtigste Technik: Paging

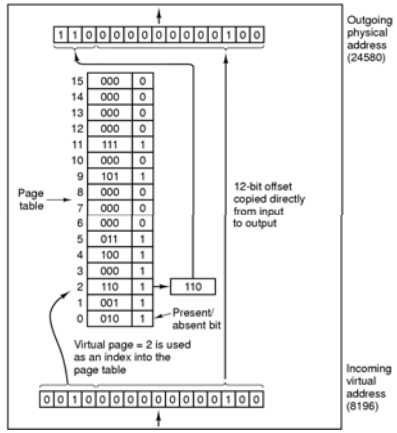
Paging

- Der physikalische Speicher wird in Kacheln (frames) fester Größe eingeteilt.
- Der logische Adressraum wird in Seiten (pages) gleicher Größe eingeteilt.
- Logische Adressen werden in eine Seitennummer (page number) und eine seitenrelative Adresse (page offset) aufgeteilt.
- Eine Umsetzungstabelle (page table) bildet die Seiten auf die verfügbaren Kacheln ab.
- Die Seiten eines Adressraums können beliebig auf die verfügbaren Kacheln verteilt sein.



Page Tables

- In der Seitentabelle gibt der Index die Nummer der virtuellen Seite an; der Tabelleneintrag gibt dann die zugehörige physikalische Seite an.
- Beispiel: 16 mögliche virtuelle Seiten werden auf 8 vorhandene physikalische Kacheln abgebildet.
- Ein spezielles Bit gibt an, ob die virtuelle Seite vorhanden ist.



Eigenschaften des Paging

- Keine externe Fragmentierung. Allerdings wird die letzte Seite eines logischen Adressraums normalerweise nicht vollständig genutzt (interne Fragmentierung).
- Gemeinsamer Speicher lässt sich mit Hilfe von gemeinsamen Seiten realisieren.
- Speicherschutz wird durch Schutzbits realisiert. Weitere Bits geben an, ob eine Kachel gültig ist (valid) oder ob eine Kachel modifiziert wurde (modified).
- Es muss nicht der gesamte Adressraum eines Prozesses im Speicher sein, um ihn auszuführen. Zugriffe auf gerade nicht geladene Seiten lösen einen Seitenfehler (page fault) aus.
- Das Betriebssystem behandelt Seitenfehler, indem es die benötigte Seite in eine freie Kachel einlagert und den Befehl, der den Seitenfehler auslöste, neu startet.
- Realisierungsprobleme:
  - Die Adressabbildung muss sehr schnell sein.
    (In manchen Fällen sind mehrere Umsetzungen für einen Maschinenbefehl notwendig.)
  - Die Umsetzungstabelle kann extrem groß werden.
    (32-Bit Adressen erfordern bei einer Seitengröße von 4096 Bytes eine Tabelle mit ca. 1 Million Einträgen.)

Behandlung von Seitenfehlern

1. Die Hardware erkennt den Seitenfehler und erzeugt eine Unterbrechung.
2. Das Betriebssystem sichert die Register des Prozesses.
3. Die Prozedur zur Behandlung von Seitenfehlern ermittelt die Adresse der fehlenden Seite.
4. Das Betriebssystem prüft, ob auf die Adresse überhaupt zugegriffen werden darf.
5. Das Betriebssystem wählt eine freie Kachel aus. Falls keine freie Kachel existiert, wird eine belegte Kachel ausgewählt.
6. Falls die ausgewählte Kachel belegt ist und modifiziert wurde, wird sie auf dem Hintergrundspeicher gesichert. Ein Prozesswechsel findet statt, sofern rechenbereite Prozesse existieren.
7. Sobald eine freie Kachel da ist, wird eine E/A-Operation gestartet, um die benötigte Kachel vom Hintergrundspeicher zu laden. Ein Prozesswechsel findet statt, sofern rechenbereite Prozesse existieren.
8. Sobald die Kachel geladen ist, wird die Umsetzungstabelle aktualisiert.
9. Der Befehlszähler wird auf den Befehl zurückgesetzt, der den Seitenfehler auslöste.
10. Der Prozess wird in den Zustand *ready* gesetzt und in die CPU-Warteschlange eingereiht.

Speicherverwaltung

- Einführung
- Swapping
- Virtual Memory
- **Seitenersetzungsstrategien**
- Segmentierung

Ladestrategien

- Die Ladestrategie bestimmt, wann Seiten in den Hauptspeicher geladen werden:
  - Swapping:
    Übertragung eines ganzen Adressraums mit einem einzigen Zugriff auf den Hintergrundspeicher.
  - Demand-Paging:
    Die benötigten Seiten werden genau dann in den Speicher geladen, wenn auf sie zugegriffen wird.
  - Pre-Paging:
    Es werden Seiten geladen, auf die in der Zukunft ein Zugriff erwartet wird. Erfordert Kenntnisse über typische Zugriffsmuster.
  - Page-Clustering:
    Gemeinsame Übertragung von mehreren zusammengehörigen Seiten. Ermöglicht die Nutzung großer Seiten auf Hardware, die nur geringe Seitengrößen unterstützt.
- In der Praxis dominiert Demand-Paging, obwohl dies bei Transportkosten, die nicht monoton mit der Anzahl der transportierten Seiten wachsen, nicht unbedingt optimal ist.

Ersetzungsstrategien

- Die Ersetzungsstrategie (replacement algorithm) bestimmt, welche der belegten Kacheln ausgelagert werden, damit wieder freie Kacheln zur Einlagerung von benötigten Seiten vorhanden sind.
- Lokale Strategien weisen jedem Prozess eine konstante Anzahl von Seiten zu. Seitenfehler wirken sich daher nur auf den verursachenden Prozess negativ aus.
- Bei globalen Strategien wird der gesamte Speicher dynamisch auf alle Prozesse verteilt, um eine effiziente Nutzung des Hauptspeichers zu erreichen.

Lokalitätsprinzip

- Lokalität bezeichnet das Verhalten eines Programms, innerhalb einer bestimmten Zeit seine Speicherzugriffe auf einen kleinen Teil seines Adressraums zu beschränken.
- Das Lokalitätsprinzip gilt für Seitenzugriffsverhalten mit folgenden Eigenschaften:
  - Zu jeder Zeit verteilt ein Programm seine Speicherzugriffe in nicht gleichförmiger Weise über seine Seiten.
  - Die Korrelation zwischen den Zugriffsmustern für unmittelbare Vergangenheit und unmittelbare Zukunft ist im Mittel hoch, und die Korrelation zwischen sich nicht überlappenden Referenzstrings geht mit wachsendem Abstand zwischen ihnen gegen 0.
  - Die Referenzdichten der einzelnen Seiten, d.h. die Wahrscheinlichkeit mit der eine Seite zum Zeitpunkt *t* zum Referenzstring gehört, ändern sich nur langsam, d.h. sie sind quasi stationär.
- Praktische Gründe für die Gültigkeit des Lokalitätsprinzips sind Schleifen und Modulbereiche von Programmen. Allerdings ist Lokalität bei manchen Programmen oder Algorithmen nicht unbedingt gegeben (z.B. Datenbanken oder einige Verfahren zur Manipulation sehr großer Matrizen).

Ersetzungsstrategien

- Beladys Optimalalgorithmus (BO)
  - Es wird die Seite ersetzt, auf die in der Zukunft am längsten nicht zugegriffen wird (Realisierbarkeit??).
- Least Recently Used (LRU)
  - Es wird die Seite ersetzt, auf die am längsten nicht mehr zugegriffen wurde.
- Least Frequently Used (LFU)
  - Es wird die Seite ersetzt, auf die am wenigsten zugegriffen wurde.
- First In First Out (FIFO)
  - Es wird die Seite ersetzt, die bereits am längsten im Speicher steht.
- Second Chance (SC)
  - Es wird wie beim FIFO ersetzt. Allerdings werden Seiten übersprungen, auf die seit dem letzten Seitenfehler zugegriffen wurde, sofern es Seiten gibt, auf die nicht zugegriffen wurde.

☑ Zusätzlich wird oftmals betrachtet, ob die Seite modifiziert wurde oder nicht, da eine unmodifizierte Seite nicht auf dem Hintergrundspeicher gesichert werden muss.

Beladys Anomalie

- Intuitiv erwartet man, dass sich Seitenfehler reduzieren, wenn man den verfügbaren Hauptspeicher vergrößert.
- ABER: folgendes Beispiel:
  Referenzstring *w = 1 2 3 4 1 2 5 1 2 3 4 5* und FIFO Ersetzungsstrategie:

Jüngste Seite	1	2	3	4	1	2	5	5	5	3	4	4
		1	2	3	4	1	2	2	2	5	3	3
Älteste Seite			1	2	3	4	1	1	1	2	5	5

Speichergröße m=3
(9 Seitenfehler)

1	2	3	4	4	4	5	1	2	3	4	5	
	1	2	3	3	3	4	5	1	2	3	4	
		1	2	2	2	3	4	5	1	2	3	
			1	1	1	2	3	4	5	1	2	

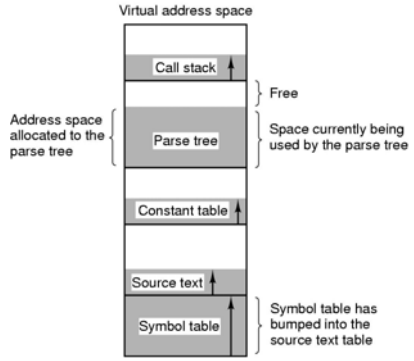
Speichergröße m=4
(10 Seitenfehler)

Speicherverwaltung

- Einführung
- Swapping
- Virtual Memory
- Seitenersetzungsstrategien
- **Segmentierung**

Segmentierung

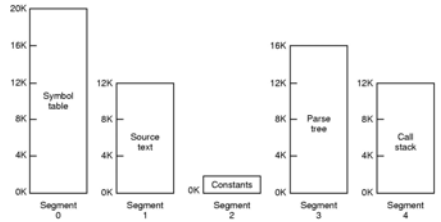
- Bisher: eindimensionaler Adressraum, in dem alle Tabellen, Programmtext etc. in ein- und demselben Adressraum abgelegt werden.
- Problem: was passiert, wenn die Tabellen nach dem Anlegen und der fortschreitenden Übersetzung eines Programms zu groß werden und in einen anderen Bereich „hineinwachsen?



- Alle „Lösungen“ mit einem Adressraum erfordern Modifikationen am Compiler, die man vermeiden möchte.

Segmentierung

- Andere Idee: stelle jedem Programm mehrere virtuelle Adressräume zur Verfügung, die es für die jeweiligen Daten verwenden kann → Segmentierung des virtuellen Adressraums



- Eine Adresse besteht dann aus Segment-Nummer und Adresse.
- Vorteile der Segmentierung
  - Segmente können wachsen, Management durch das BS
  - Linken wird wegen der jeweiligen Startadresse 0 stark vereinfacht
  - Shared Libraries können leicht realisiert werden (Schutz!)

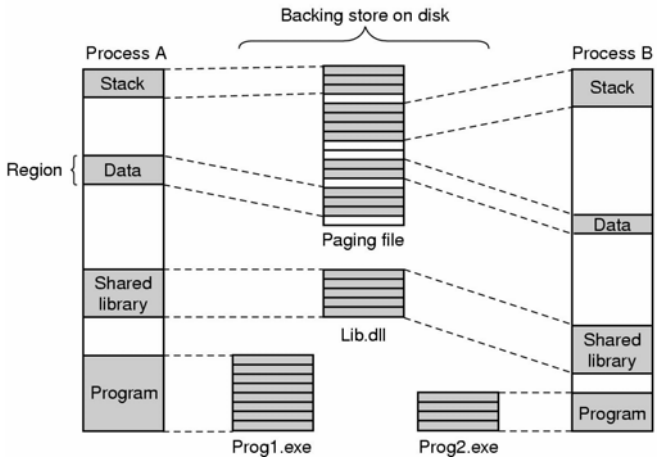
Vergleich Paging - Segmentierung

Consideration	Paging	Segmentation
Need the programmer be aware that this technique is being used?	No	Yes
How many linear address spaces are there?	1	Many
Can the total address space exceed the size of physical memory?	Yes	Yes
Can procedures and data be distinguished and separately protected?	No	Yes
Can tables whose size fluctuates be accommodated easily?	No	Yes
Is sharing of procedures between users facilitated?	No	Yes
Why was this technique invented?	To get a large linear address space without having to buy more physical memory	To allow programs and data to be broken up into logically independent address spaces and to aid sharing and protection

Kombination von Segmentierung und Paging

- Segmentierung und Paging kann gleichzeitig eingesetzt werden, um die Vorteile beider Ansätze zu kombinieren.
- Zum Beispiel wird es sinnvoll sein, Segmente aufzuteilen, wenn sie nicht komplett in den Hauptspeicher passen.
- Moderne Prozessorfamilien unterstützen meist beide Modelle, um für beliebige Betriebssysteme offen zu sein.
- Ein Pentium besitzt insgesamt 16 K Segmente, wobei jedes bis zu 10^9 32-Bit-Worte speichern kann. Diese Segmentgröße ist relativ groß.

Shared Libraries



Speicherverwaltung in Windows

- Windows besitzt ein sehr anspruchsvolles virtuelles Speichersystem.
- Jeder Benutzerprozess hat 4 GB virtuellen Speicher verfügbar (32-Bit-Adressen).
- Seitengröße für Paging: 4 KB
- Shared files (shared libraries) können verwendet werden

Ein- und Ausgabe

- Grundlagen von Ein-/Ausgabe-Hardware und –Software
- I/O-Software-Schichten

I/O-Hardware – Grundlagen

- Wir betrachten I/O-Hardware wie Hard Disks, Bildschirme, Drucker etc. hier eigentlich als Blackbox, die wir irgendwie programmieren müssen.
- Trotzdem: kurzer Überblick über den Aufbau solcher Geräte
- Hauptthema: wie bekomme ich Daten von und zu den Geräten
  - Device Controller
  - Memory Mapped I/O
  - Interrupts

Device Controller

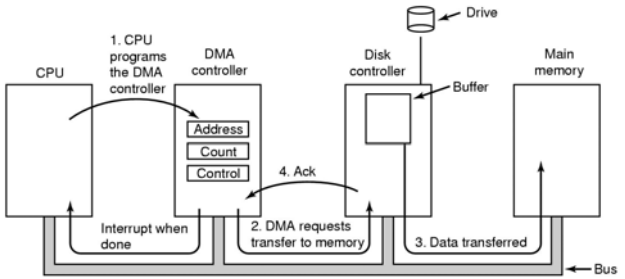
- I/O–Geräte haben zwei Komponenten:
  - mechanisch
  - elektronisch
- Die elektronische Komponente ist der Device Controller (Gerätesteuerung)
- Aufgaben
  - Konvertiere seriellen Bitstrom in Datenblöcke
  - Führe Fehlerkorrektur durch wenn notwendig
  - Mache die Daten dem Hauptspeicher verfügbar

Memory-Mapped I/O

- Wie kommuniziert die CPU/das OS mit dem Device Controller?
  - Jeder Controller hat einige Steuerungsregister, in die die CPU Befehle schreiben kann
  - Zusätzlich haben viele Geräte einen Datenpuffer, der vom OS geschrieben/gelesen werden kann (Beispiel: Videospeicher für Bildschirmpixel)
- Ansätze:
  - Spezieller Speicher, spezielle Instruktionen zum Zugriff (I/O-Ports)
  - Memory-Mapped: ein Teil des Hauptspeichers wird für die Kommunikation mit dem Gerät reserviert

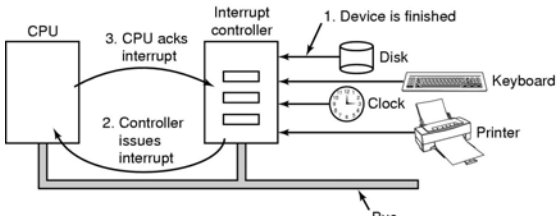
Direct Memory Access (DMA)

- I/O kann mittels DMA deutlich beschleunigt werden, da die CPU weniger belastet ist
- Prinzip: vergib einen Auftrag an DMA-Controller, erledige bis zum Ende der Bearbeitung andere Dinge
- Ablauf eines DMA-Transfers:



Interrupts

- Interrupts werden von Geräten verwendet, um das Ende eines Vorgangs anzuzeigen.
- Ablauf:



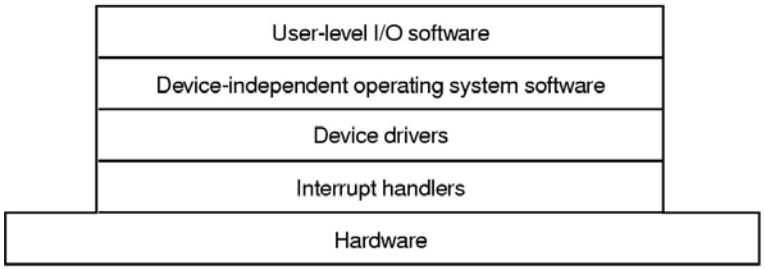
- Die CPU wird unterbrochen und beginnt etwas Neues – abhängig vom auslösenden Gerät wird ein bestimmter Interrupt-Handler aufgerufen und ausgeführt.
- Später macht die CPU an der „alten“ Stelle weiter.

I/O-Software – Grundlagen

- I/O-Software soll vor allem die Komplexität der Hardware vor dem OS bzw. dem Anwendungsprogrammierer verbergen.
- Wichtige Prinzipien daher:
  - Geräteunabhängigkeit: ein „write“ funktioniert auf Disk genauso wie auf das Netzwerk
  - Einheitliche Namensverwendung (alle Geräte sind bspw. über Pfade im Dateisystem erreichbar)
  - Fehlerbehandlung so nah wie möglich an der Quelle (Hardware)

Schichten der I/O-Software

- Typische Organisation: 4 Schichten



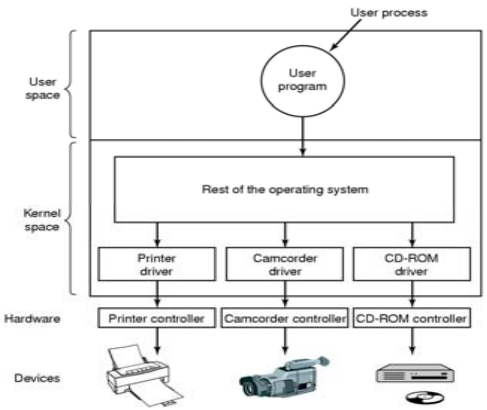
- Jede Schicht führt eine wohldefinierte Funktion aus und besitzt genauso ein wohldefiniertes Interface

Interrupt Handler

- Interrupts sind kompliziert und sollten deshalb möglichst weit unten verborgen werden.
- Beste Variante: der Device Driver startet einen Auftrag und blockiert dann, bis er vom Interrupt Handler wieder „geweckt“ wird.
- Handling von Interrupts benötigt meist auch größere Beteiligung der CPU, vor allem wenn Virtual Memory eingesetzt wird (Modifikation von Seitentabellen)

Device Driver

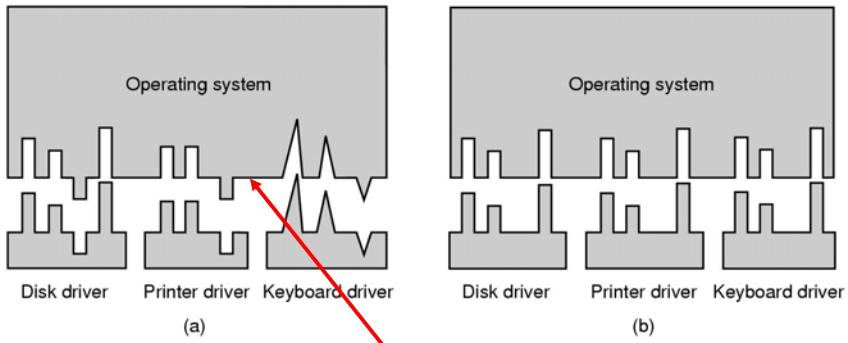
- Aufgabe: Verbergen der Komplexität der Registerbelegungen des Controllers
- Jedes Gerät benötigt üblicherweise seinen eigenen Device Driver
- Driver sind praktisch immer Teil des Kernels
- API für die darüber liegende Schicht: read- und write-Anfragen



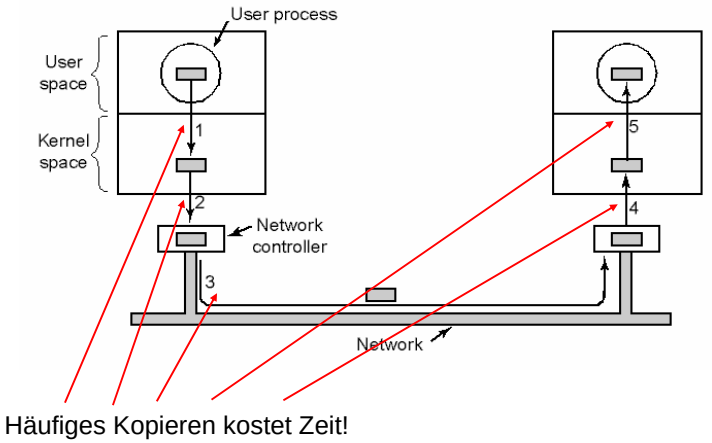
Geräteunabhängige I/O-Software

- Wichtige Aufgaben:
  - Bereitstellen einheitlicher Schnittstellen für Gerätetreiber erleichtert den Einsatz neuer Geräte
  - Puffern von verfügbaren Daten erhöht die Performance (kein Interrupt pro ankommendes Datum, sondern pro Block); Problem: zu langes Liegen von Daten im Puffer, zu viele Kopien zwischen Speicherbereichen (Kernel, User Space, Gerät) → schlechte Performance
  - Geräteunabhängige Fehlerbehandlung
  - Spezielle Behandlung dedizierter Geräte (CD-ROM) z.B. durch explizites „open“
  - Bereitstellung einer einheitlichen Blockgröße

Beispiel: einheitliche Schnittstellen



Buffering als Performance-Fresser



I/O-Software im User Space

- Im wesentlichen Bibliotheken, die mit den Anwendungsprogrammen gelinkt werden
- Beispiele:
  - write, read, open, close
  - printf()
- Zum Teil einfach nur Abbildung auf die entsprechenden Systemaufrufe, zum Teil aber auch Aufgaben wie Formatierung der Daten (printf)

Dateisysteme

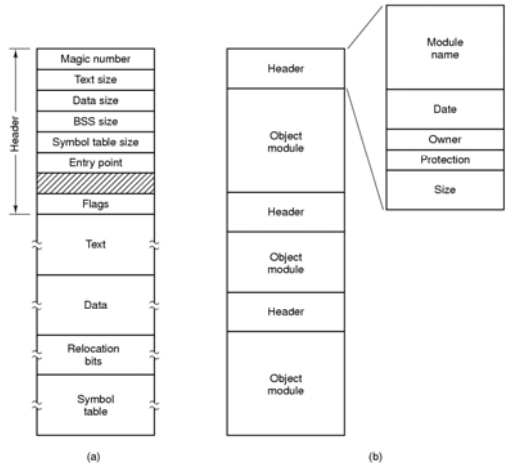
- Einführung
- Verzeichnisse
- Unix-Dateisystem

Einführung

- Dateien sind Behälter für dauerhaft gespeicherte Informationen (Daten und Programme). Im einfachsten Fall enthalten Dateien eine nicht weiter strukturierte Folge von Bytes.
- Applikationen interpretieren in der Regel den Inhalt von unstrukturierten Dateien als ein bestimmtes Dateiformat (oftmals über Namenskonventionen identifiziert):
  - Textdateien (.txt), Quelltexte (.c, .h, .cc, .java, ...), Objektdateien (.o, .obj, ...)

Einführung: Dateiformate

- Unterschiedliche Dateiformen besitzen unterschiedliche Formate
- Beispiel:
  - (a) Executable
  - (b) Archiv



Dateiattribute

- Neben einem Namen und den Daten besitzt eine Datei zusätzlich Attribute.
- Attribute geben wichtige Informationen über die Datei:
  - Länge
  - Erstellungs-datum
  - Besitzer
  - Schutz
  - ...

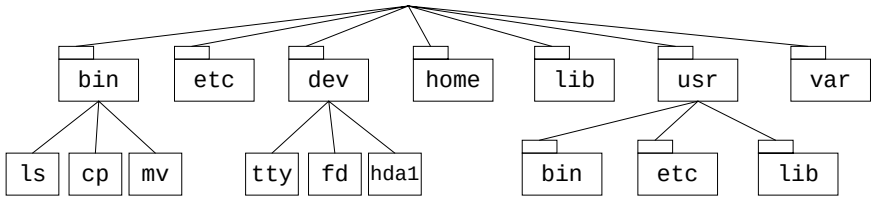
Attribute	Meaning
Protection	Who can access the file and in what way
Password	Password needed to access the file
Creator	ID of the person who created the file
Owner	Current owner
Read-only flag	0 for read/write; 1 for read only
Hidden flag	0 for normal; 1 for do not display in listings
System flag	0 for normal files; 1 for system file
Archive flag	0 for has been backed up; 1 for needs to be backed up
ASCII/binary flag	0 for ASCII file; 1 for binary file
Random access flag	0 for sequential access only; 1 for random access
Temporary flag	0 for normal; 1 for delete file on process exit
Lock flags	0 for unlocked; nonzero for locked
Record length	Number of bytes in a record
Key position	Offset of the key within each record
Key length	Number of bytes in the key field
Creation time	Date and time the file was created
Time of last access	Date and time the file was last accessed
Time of last change	Date and time the file has last changed
Current size	Number of bytes in the file
Maximum size	Number of bytes the file may grow to

Operationen auf Dateien (POSIX)

- Grundlegende Dateioperationen:
  - Öffnen einer Datei:
    ```
    int open(const char *filename, int flags, mode_t mode)
    int creat(const char *path, mode_t mode)
    ```
  - Schließen einer geöffneten Datei:
    ```
    int close(int fd)
    ```
  - Lesen/Schreiben von Daten aus/in eine geöffnete Datei:
    ```
    ssize_t read(int fd, void *buffer, size_t len)
    ssize_t write(int fd, const void *buffer, size_t len)
    ```
  - Positionieren in einer göffneten Datei:
    ```
    off_t lseek(int fd, off_t offset, int whence)
    ```
  - Verkürzen einer geöffneten Datei:
    ```
    int ftruncate(int fd, off_t size)
    ```
- Dateideskriptoren (file descriptors) identifizieren innerhalb eines Benutzerprozesses eine geöffnete Datei.

Verzeichnisse

- Hierarchische Strukturierung des externen Speichers
  - Verzeichnisse erzeugen einen hierarchischen Namensraum.
  - Daten befinden sich in den Dateien an den „Blättern“ der Hierarchie.
  - Namen von Dateien und Verzeichnissen auf einer Hierarchiestufe eindeutig.
  - Absolute Namen durch Aneinanderreihung der Verzeichnisnamen und des Dateinamen.
- Beispiel: UNIX Dateibaum

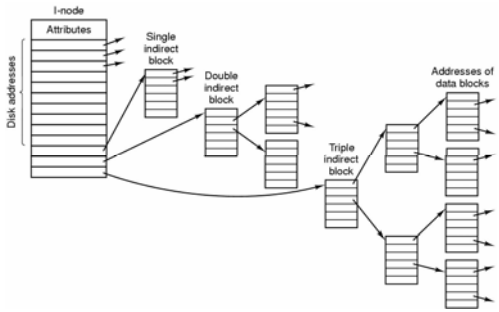


Beispiel: das Unix V7 Dateisystem

- Das System ist in Baumform angeordnet, mit einem root-Verzeichnis.
- Datei- und Verzeichnisnamen können jeden ASCII-Buchstaben enthalten außer „/“ und NUL.
- Ein Verzeichniseintrag enthält einen Eintrag für jede Datei in diesem Verzeichnis. Verwendet wird das iNode-Schema.
- Ein iNode enthält für jede Datei die Attribute sowie die Adressen der Datei auf der Platte.

iNodes in UNIX V7

- Für kleine Dateien reicht ein iNode.
- Wenn die Dateien größer werden, müssen Indirektionen auf weitere iNodes verwendet werden
  - Single indirect block
  - Double indirect block
  - Triple indirect block



Ausblick