

# Betriebssysteme (BS)

## VL 9 – Architekturen

**Daniel Lohmann**

Lehrstuhl für Informatik 4  
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

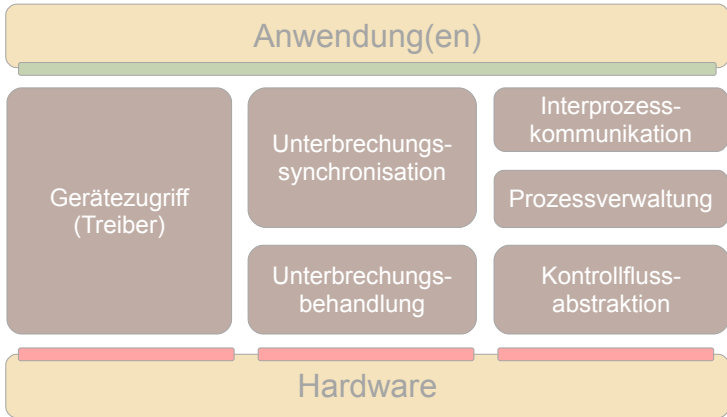
Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen Nürnberg

WS 10 – 15. Dezember 2010

[http://www4.informatik.uni-erlangen.de/Lehre/WS10/V\\_BS](http://www4.informatik.uni-erlangen.de/Lehre/WS10/V_BS)



# Überblick: Einordnung dieser VL



Betriebssystementwicklung



- Einführung
  - Bewertungskriterien für Betriebssysteme
  - Paradigmen der Betriebssystementwicklung
- Geschichte, Mode und Trend
- Aktuelle Entwicklungen
- Zusammenfassung
- Referenzen



- Einführung
  - Bewertungskriterien für Betriebssysteme
  - Paradigmen der Betriebssystementwicklung
- Geschichte, Mode und Trend
- Aktuelle Entwicklungen
- Zusammenfassung
- Referenzen



## ■ Anwendungsorientierte Kriterien

### ■ **Portabilität**

- *Wie unabhängig ist man von der Hardware?*

### ■ **Erweiterbarkeit**

- *Wie leicht lässt sich das System erweitern (z. B. um neue Gerätetreiber)?*

### ■ **Robustheit**

- *Wie stark wirken sich Fehler in Einzelteilen auf das Gesamtsystem aus?*

### ■ **Leistung**

- *Wie gut ist die Hardware durch die Anwendung auslastbar?*

## ■ Technische Kriterien (Architektureigenschaften)

### ■ **Isolationsmechanismus**

- *Wie werden Anwendungen / BS-Komponenten isoliert?*

### ■ **Interaktionsmechanismus**

- *Wie kommunizieren Anwendungen / BS-Komponenten miteinander?*

### ■ **Unterbrechungsmechanismus**

- *Wie werden Unterbrechungen zugestellt und bearbeitet?*



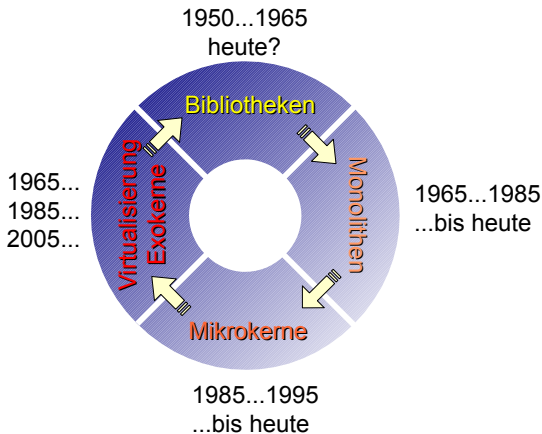
## Paradigmen der Betriebssystementwicklung

### Definition: Paradigma

Das Wort **Paradigma** [...] bedeutet „*Beispiel*“, „*Vorbild*“, „*Muster*“ oder „*Abgrenzung*“, „*Vorurteil*“, in allgemeinerer Form auch „**Weltsicht**“ oder „**Weltanschauung**“. [Wikipedia]



## Paradigmen der Betriebssystementwicklung

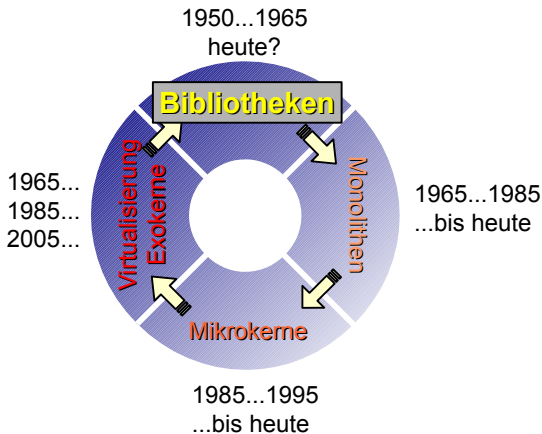


- Einführung
- **Geschichte, Mode und Trend**
  - Bibliotheks-Betriebssysteme
    - Monolithen
    - Mikrokerne
    - Exokerne und Virtualisierung
- Aktuelle Entwicklungen
- Zusammenfassung
- Referenzen





## Funktionsbibliotheken als einfache Infrastrukturen



- Erste Rechnersysteme besaßen keinerlei Systemsoftware
  - Jedes Programm musste die gesamte Hardware selbst ansteuern
  - Systeme liefen Operator-gesteuert im Stapelbetrieb
    - single tasking, Lochkarten
  - Peripherie war vergleichsweise einfach
    - Seriell angesteuerter Lochkartenleser und -schreiber, Drucker, Bandlaufwerk
- Code zur Geräteansteuerung wurde in jedem Anwendungsprogramm repliziert
  - Die Folge war eine massive Verschwendung von
    - Entwicklungszeit (teuer!)
    - Übersetzungszeit (sehr teuer!)
    - Speicherplatz (teuer!)
  - außerdem eine hohe Fehleranfälligkeit

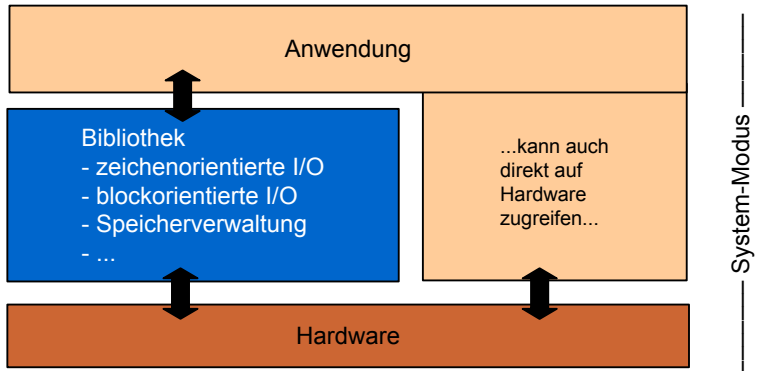


## ■ **Logische Folge:** Bibliotheks-Betriebssysteme

- Zusammenfassung von häufig benutzen Funktionen zur Ansteuerung von Geräten in **Software-Bibliotheken** (*Libraries*)
  - Systemfunktionen als „normale“ Subroutinen
- Funktionen der Bibliothek waren dokumentiert und getestet
  - verringerte Entwicklungszeit (von Anwendungen)
  - verringerte Übersetzungszeit (von Anwendungen)
- Bibliotheken konnten resident im Speicher des Rechners bleiben
  - verringerter Speicherbedarf (der Anwendungen)
  - verringerte Ladezeit (der Anwendungen)
- Fehler konnten von Experten zentral behoben werden
  - verbesserte Zuverlässigkeit



# Architektur: Bibliotheks-Betriebssysteme



## ■ Anwendungsorientierte Kriterien

### ■ **Portabilität**

- keine Standards, eigene Bibliotheken für jede Architektur

gering

### ■ **Erweiterbarkeit**

- theoretisch gut, in der Praxis oft „Spaghetti-Code“

mäßig

### ■ **Robustheit**

- *single tasking*, Kosten für Programmwechsel sehr hoch

sehr hoch

### ■ **Leistung**

- direktes Operieren auf der Hardware, keine Privilegebenen

sehr hoch

## ■ Technische Kriterien (Architektureigenschaften)

### ■ **Isolationsmechanismus**

- Anwendung  $\equiv$  System

nicht erforderlich

### ■ **Interaktionsmechanismus**

- Betriebssystem  $\equiv$  Bibliothek

Funktionsaufrufe

### ■ **Unterbrechungsmechanismus**

- Kommunikation mit Geräten über *polling*

oft nicht vorhanden



- Teure Hardware wird nicht optimal ausgelastet
  - Hoher Zeitaufwand beim Wechseln der Anwendung
  - Warten auf Ein-/Ausgabe verschwendet unnötig CPU-Zeit
- Organisatorische Abläufe sehr langwierig
  - Stapelbetrieb, Warteschlangen
  - von der Abgabe eines Programms bis zum Erhalt der Ergebnisse vergehen oft Tage – um dann festzustellen, dass das Programm in der ersten Zeile einen Fehler hatte...
- Keine Interaktivität möglich
  - Betrieb durch Operatoren, kein direkter Zugang zur Hardware
  - Programmabläufe nicht zur Laufzeit parametrierbar

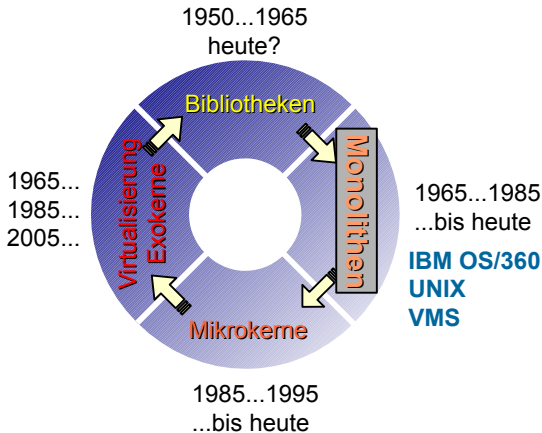


- Einführung
- **Geschichte, Mode und Trend**
  - Bibliotheks-Betriebssysteme
  - **Monolithen**
  - Mikrokerne
  - Exokerne und Virtualisierung
- Aktuelle Entwicklungen
- Zusammenfassung
- Referenzen



# Überblick: Paradigmen

## Monolithen als Herrscher über das System

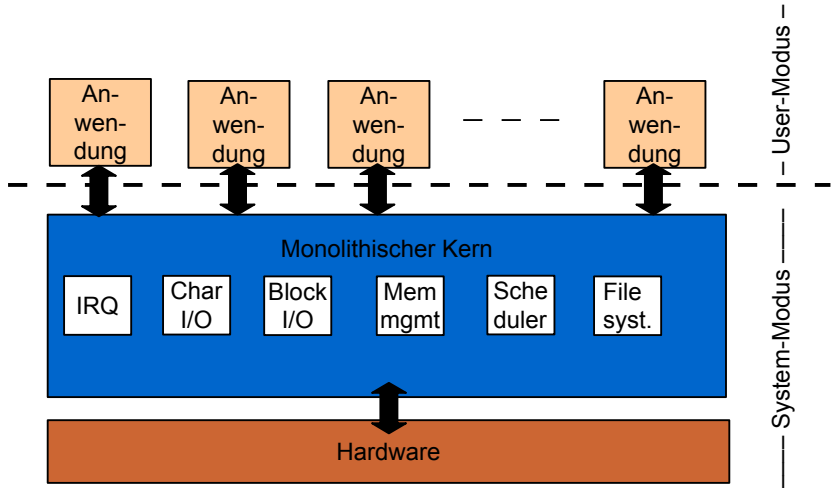




- **Motivation:** Mehrprogrammbetrieb
- **Problem:** Isolation
- **Ansatz:** BS als Super-Programm, Kontrollinstanz
  - Programme laufen unter der Kontrolle des Betriebssystems
  - Dadurch erstmals (sinnvoll) Mehrprozess-Systeme realisierbar
- Einführung eines Privilegiensystems
  - Systemmodus  $\longleftrightarrow$  Anwendungsmodus
  - Direkter Hardwarezugriff nur im Systemmodus
    - ↪ Gerätetreiber gehören zum System
- Einführung neuer Hard- und Software-Mechanismen
  - *Traps* in den Kern
  - Kontextumschaltung und -sicherung
  - *Scheduling* der Betriebsmittel



# Architektur: Monolithische Systeme



- Eines der ersten monolithischen Betriebssysteme
  - Ziel: gemeinsames BS für alle IBM-Großrechner
  - Leistung und Speicher der Systeme differierten aber um Zehnerpotenzen zwischen „kleinen“ und „großen“ 360-Systemen
- Diverse Konfigurationen
  - PCP (Primary Control Program) 1965
    - Einprozessbetrieb, kleine Systeme
  - MFT (Multiprogramming with Fixed number of Tasks) 1966
    - mittlere Systeme (256 kB RAM)
    - feste Speicherpartitionierung zwischen Prozessen, feste Anzahl an Tasks
  - MVT (Multiprogramming with Variable number of Tasks): 1967
    - high end
    - Paging, optional Time Sharing Option (TSO) für interaktive Nutzung



# Monolithische Systeme: IBM OS/360

Kontrollpult einer IBM 360 („big iron“)



- Richtungsweisende Konzepte
  - Hierarchisches Dateisystem
  - Prozesse können Unterprozesse erzeugen
  - Familienansatz: MFT und MVT sind von API und ABI her kompatibel
- Große Probleme bei der Entwicklung
  - Fred Brooks: „The Mythical Man-Month“ [6] **lesenswert!**
  - Problem der Konzeptuellen Integrität
    - Separation von Architektur und Implementierung war schwierig
  - „Second System Effect“
    - Entwickler wollten die „eierlegende Wollmilchsau“ bauen
  - Zu komplexe Abhängigkeiten zwischen Komponenten des Systems
    - Ab einer gewissen Codegröße blieb die Anzahl der Fehler konstant

~ Geburt der **Softwaretechnik**



- Ziel: Mehrprogrammbetrieb auf „kleinen“ Computern
  - Entwicklung seit Anfang der 70er Jahre
    - Kernelgröße im Jahr 1979 (7th Edition Unix, PDP11): ca. 50kB
  - von ursprünglich 2-3 Entwicklern geschrieben
    - überschaubar und handhabbar, ca. 10.000 Zeilen Quelltext
- Neu: Portabilität durch Hochsprache
  - C als domänenspezifische Sprache für Systemsoftware
  - UNIX wurde mit den Jahren auf nahezu jede Plattform portiert
- Weitere richtungsweisende Konzepte:
  - alles ist eine Datei, dargestellt als ein Strom von Bytes
  - komplexe Prozesse werden aus einfachen Programmen komponiert
    - Konzept der Pipe, Datenflussparadigma



# Monolithische Systeme: Bell Labs/AT&T UNIX



Historische PDP11



- Weitere Entwicklung von UNIX erfolgte stürmisch
  - Systeme mit großem Adressraum (VAX, RISC)
  - Der Kernel ist „mit gewachsen“ (System III, System V, BSD)
    - ohne wesentliche Strukturänderungen
  - Immer mehr komplexe Subsysteme wurden integriert
    - TCP/IP ist ungefähr so umfangreich wie der Rest des Kernels
- Linux orientiert(e) sich an der Struktur von System V
- UNIX war und ist einflussreich im akademischen Bereich durch frühe „Open Source“-Politik der Bell Labs
  - Viele Portierungen und Varianten entstanden
    - oftmals parallel zu Hardwareentwicklungen
  - In der akademischen Welt wurde UNIX zum Referenzsystem
    - Ausgleichspunkt und Vergleichssystem für alle neueren Ansätze





## ■ Anwendungsorientierte Kriterien

- **Portabilität** hoch
  - dank „C“ kann und konnte UNIX einfach portiert werden
- **Erweiterbarkeit** mäßig
  - von Neukompilierung  $\rightsquigarrow$  Modulkonzept
- **Robustheit** mäßig
  - Anwendungen isoliert, nicht jedoch BS-Komponenten (Treiber!)
- **Leistung** hoch
  - Nur Betreten / Verlassen des Kerns ist teuer

## ■ Technische Kriterien (Architektureigenschaften)

- **Isolationsmechanismus** Privilegien, Adressräume
  - Pro Anwendung ein Adressraum, Kern läuft auf Systemebene
- **Interaktionsmechanismus** Funktionsaufrufe, Traps
  - Anwendung  $\rightarrow$  Kern durch *Traps*, innerhalb des Kerns durch *call* / *ret*
- **Unterbrechungsmechanismus** Bearbeitung im Kern
  - interne Unterteilung in UNIX: *bottom half*, *top half*



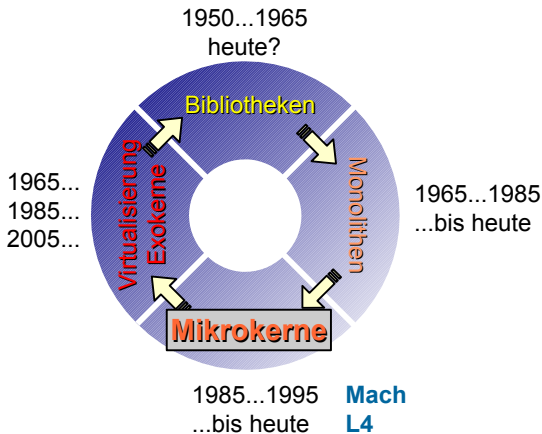
- Monolithen sind schwer handhabbar
  - Hinzufügen oder Abändern von Funktionalität betrifft oft mehr Module, als der Entwickler vorhergesehen hat
- Eingeschränkte Synchronisationsmechanismen
  - Oft nur ein „Big Kernel Lock“, d. h. nur ein Prozess kann zur selben Zeit im Kernmodus ausgeführt werden, alle anderen warten
  - Insbesondere bei Mehrprozessor-Systemen leistungsreduzierend
- Gemeinsamer Adressraum aller Kernkomponenten
  - Sicherheitsprobleme in einer Komponente (z.B. buffer overflow) führen zur Kompromittierung des gesamten Systems
  - Viele Komponenten laufen überflüssigerweise im Systemmodus
  - Komplexität und Anzahl von Treibern hat extrem zugenommen



- Einführung
- **Geschichte, Mode und Trend**
  - Bibliotheks-Betriebssysteme
  - Monolithen
  - **Mikrokerne**
  - Exokerne und Virtualisierung
- Aktuelle Entwicklungen
- Zusammenfassung
- Referenzen



## Mikrokerne als Reduktion auf das Notwendige



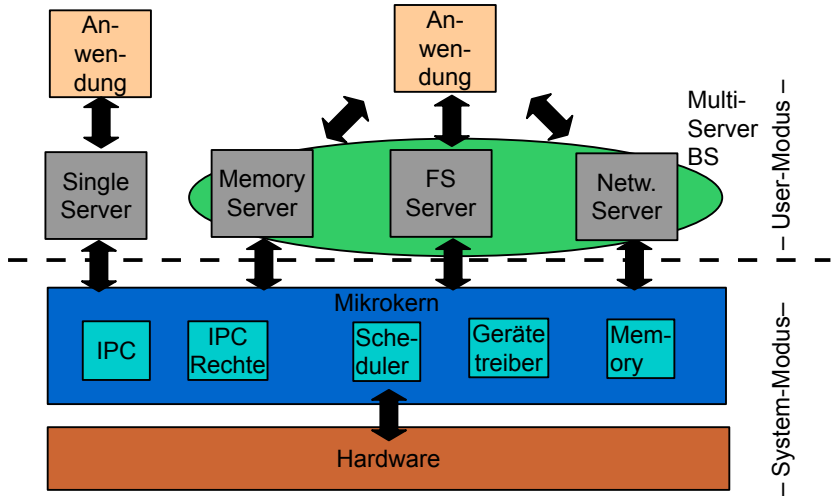
- Ziel: Reduktion der Trusted Computing Base (TCB)
  - Minimierung der im privilegierten Modus ablaufenden Funktionalität
  - BS-Komponenten als Server-Prozesse im nichtprivilegierten Modus
  - Interaktion über Nachrichten (IPC, *Inter Process Communication*)
- Prinzip des geringsten Privilegs
  - Systemkomponenten müssen nur so viele Privilegien besitzen, wie zur Ausführung ihrer Aufgabe erforderlich sind
    - z.B. Treiber: Zugriff auf spezielle IO-Register, nicht auf die gesamte HW
  - Nur der Mikrokern läuft im Systemmodus
- Geringere Codegröße
  - L4: 10 kloc C++  $\longleftrightarrow$  Linux: 1 Mloc C (ohne Treiber)
  - Ermöglicht Ansätze zur formalen Verifikation des Mikrokerns [10]



- **Ziel:** Reduktion der TCB
- **Ziel:** Schaffung eines extrem portablen Systems
- **Ziel:** Verbesserung der Unix-Konzepte
  - Neue Kommunikationsmechanismen via IPC und Ports
    - Ports sind sichere IPC-Kommunikationskanäle
    - IPC ist optional netzwerktransparent: Unterstützung für verteilte Systeme
  - Parallele Aktivitäten innerhalb eines Prozessadressraums
    - Unterstützung für Fäden ~> neuer Prozessbegriff als „Container“
    - Bessere Unterstützung für Mehrprozessorsysteme
  - Unterstützung „fremder“ Systemschnittstellen durch Personalities
- Ausgangspunkt: BSD UNIX
  - Schrittweise Separation der Funktionalität, die nicht im privilegierten Modus laufen muss in Benutzermodus-Prozesse
  - Anbindung über Ports und IPC



# Architektur: Mikrokerne erster Generation



- Probleme von Mach
  - hoher Overhead für IPC-Operationen
    - Systemaufrufe **Faktor 10** langsamer gegenüber monolithischem Kern
  - Immer noch viel zu große Code-Basis
    - Gerätetreiber und Rechteverwaltung für IPC im Mikrokern
    - ~ die eigentlichen Probleme nicht gelöst!
  - Führt zu schlechtem Ruf von Mikrokernen allgemein
    - Einsetzbarkeit in der Praxis wurde bezweifelt
- Die Mikrokern-Idee galt Mitte der 90er Jahre als tot
  - Praktischer Einsatz von Mach erfolgte nur in hybriden Systemen
    - Separat entwickelte Komponenten für Mikrokern und Server
    - Kolokation der Komponenten in einem Adressraum, Ersetzen von in-kernel IPC durch Funktionsaufrufe
  - Bekanntestes Beispiel: Apple OS X → Mach 3 Mikrokern + FreeBSD

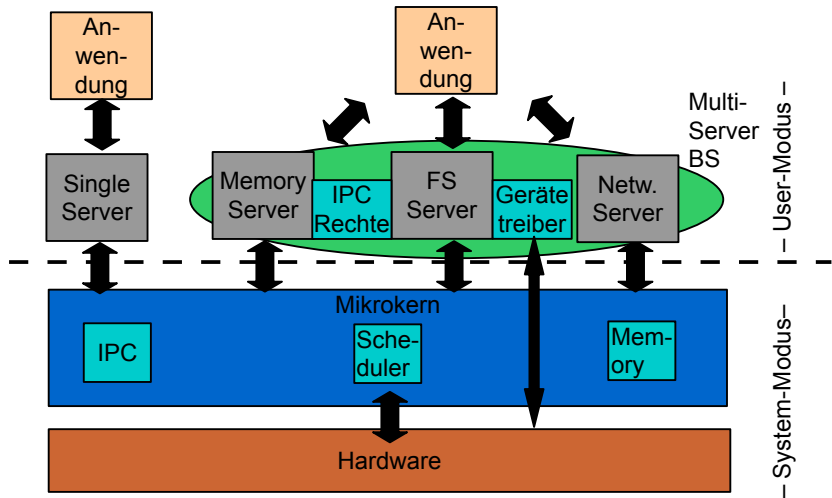




- **Ziel:** Mikrokern, diesmal aber richtig!
  - Verzicht auf Sekundärziele: Portabilität, Netzwerktransparenz, ...
- **Ansatz:** Reduktion auf das Notwendigste
  - Ein Konzept wird nur dann innerhalb des Mikrokerns toleriert, wenn seine Auslagerung die Implementierung verhindern würde.
  - synchroner IPC, Kontextwechsel, CPU Scheduler, Adressräume
- **Ansatz:** Gezielte Beschleunigung
  - fast IPCs durch Parameterübergabe in Registern
  - Gezielte Reduktion der Cache-Load (durch sehr kleinen Kern)
- Viele von Mikrokernen der 1. Generation noch im Systemmodus implementierte Funktionalität ausgelagert
  - z. B. Überprüfung von IPC-Kommunikationsrechten
  - vor allem aber: Treiber



# Architektur: Mikrokerne zweiter Generation



## ■ Anwendungsorientierte Kriterien

### ■ **Portabilität**

- ursprünglich rein in Assembler, aktuell in C++ entwickelt

mäßig

### ■ **Erweiterbarkeit**

- durch neue Server im Benutzermodus, auch zur Laufzeit

sehr hoch

### ■ **Robustheit**

- durch strikte Isolierung

sehr hoch

### ■ **Leistung**

- IPC-Performance ist **der** kritische Faktor

mäßig – gut

## ■ Technische Kriterien (Architektureigenschaften)

### ■ **Isolationsmechanismus**

Addressräume

- Ein Addressraum pro Anwendung,  
ein Addressraum pro Systemkomponente

### ■ **Interaktionsmechanismus**

IPC

- Anwendungen und Systemkomponenten interagieren über Nachrichten

### ■ **Unterbrechungsmechanismus**

IPC an Server-Prozess

- Unterbrechungsbehandlung erfolgt durch Faden im Benutzermodus

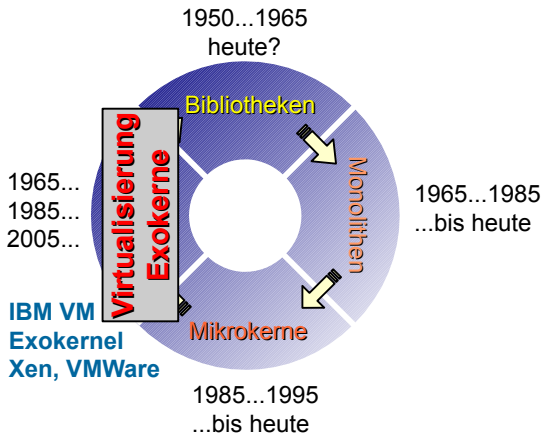


- Einführung
- **Geschichte, Mode und Trend**
  - Bibliotheks-Betriebssysteme
  - Monolithen
  - Mikrokerne
  - **Exokerne und Virtualisierung**
- Aktuelle Entwicklungen
- Zusammenfassung
- Referenzen



# Überblick: Paradigmen

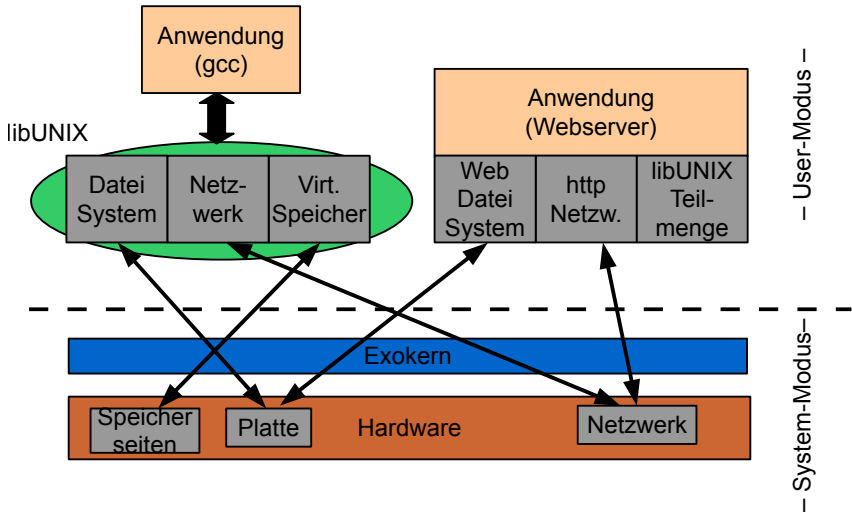
## Exokerne und Virtualisierung als weitere Reduktion



- Ziel: Leistungsverbesserung durch Reduktion
  - Entfernung von Abstraktionsebenen
  - Implementierung von Strategien (z.B. Scheduling) in der Anwendung
- Extrem kleiner Kern, dieser Implementiert nur
  - Schutz
  - Multiplexing von Ressourcen (CPU, Speicher, Disk-Blöcke, ...)
- Trennung von Schutz und Verwaltung der Ressourcen!
  - Keine Implementierung von IPC-Mechanismen (Mikrokerne) oder weiterer Abstraktionen (Monolithen)
  - Anwendungen können die *für sie* idealen Abstraktionen, Komponenten und Strategien verwenden



# Architektur: Exokern-Betriebssysteme



## ■ Anwendungsorientierte Kriterien

- **Portabilität** sehr hoch
  - Exokerne sind sehr klein
- **Erweiterbarkeit** sehr hoch
  - aber auch erforderlich! – der Exokern stellt kaum Funktionalität bereit
- **Robustheit** gut
  - Schutz wird durch den Exokern bereitgestellt
- **Leistung** sehr gut
  - Anwendungen operieren nahe an der Hardware, wenige Abstraktionsebenen

## ■ Technische Kriterien (Architektureigenschaften)

- **Isolationsmechanismus** Addressräume
  - Ein Addressraum pro Anwendung
  - + von ihr gebrauchter Systemkomponenten
- **Interaktionsmechanismus** nicht vorgegeben
  - wird von der Anwendung bestimmt
- **Unterbrechungsmechanismus** nicht vorgegeben
  - Exokern verhindert nur die Monopolisierung der CPU





- Exokernel sind nicht als Basis für die Verwendung mit beliebigen „legacy“-Anwendungen geeignet
- Anwendungen haben volle Kontrolle über Abstraktionen
  - müssen diese aber auch implementieren
  - hohe Anforderungen an Anwendungsentwickler
- Definition von Exokern-Schnittstellen ist schwierig
  - Bereitstellung adäquater Schnittstellen zur System-Hardware
  - Genaue Abwägung zwischen Mächtigkeit, Minimalismus und ausreichendem Schutz
- Bisher kein Einsatz in Produktionssystemen
  - Es existieren lediglich einige *proof-of-concept-Systeme*
  - Viele Fragen der Entwicklung von BS-Bibliotheken noch offen



- Ziel: Isolation und Multiplexing  
**unterhalb** der Systemebene
- Ansatz: Virtual Machine Monitor (VMM) / Hypervisor
  - Softwarekomponente, läuft direkt auf der Hardware
  - stellt Abstraktion Virtual Maschine (VM) zur Verfügung
- VM simuliert die gesamten Hardware-Ressourcen
  - Prozessoren, Speicher, Festplatten, Netzwerkkarten, ...
  - Container für beliebige Betriebssysteme nebst Anwendungen
- Vergleich zu Exokernen
  - größere Granularität der zugeteilten Ressourcen
    - z.B. gesamte Festplattenpartition vs. einzelne Blöcke
  - „brute force“ Ansatz
    - Multiplexen ganzer Rechner statt einzelner Betriebsmittel
  - Anwendungen (und BS) brauchen nicht angepasst werden



- Für IBM 360-Großrechner existierten mehrere Betriebssysteme
  - DOS/360, MVS: Stapel-orientierte Bibliotheks-Betriebssysteme
  - OS/360: Midrange Server-System
  - TSS/360: Interaktives Mehrbenutzersystem mit Time-Sharing
  - Kundenspezifische Entwicklungen
- Problem: wie kann man Anwendungen für all diese Systeme *gleichzeitig* verwenden?
  - Hardware war teuer (Millionen von US\$)
- Entwicklung der ersten Systemvirtualisierung „VM“ durch Kombination aus Emulation und Hardware-Unterstützung
  - Harte Partitionierung der Betriebsmittel
  - Gleichzeitiger Betrieb von stapelverarbeitenden und interaktiven Betriebssystemen wurde ermöglicht



- Ausgangslage: Problematik wie bei IBM in den 60er Jahren
  - Hardware wird immer leistungsfähiger – wohin mit den Ressourcen?
  - Ablauf mehrerer Betriebssystem-Instanzen gleichzeitig
  - Serverkonsolidierung, Kompatibilität zu Anwendungen
- Problem: IA-32 ist eigentlich nicht virtualisierbar
  - Virtualisierungskriterien von Popek und Goldberg [14] sind nicht erfüllt
  - Insbesondere: Äquivalenzanforderung – nicht alle Ring 0 Befehle trappen bei Ausführung auf Ring 3
- Ansatz: Paravirtualisierung
  - „kritische Befehle“ werden ersetzt
    - entweder zur Übersetzungszeit (Xen) oder zur Laufzeit (VMWare)
  - VMs laufen in Ring 3, Ringmodell durch Adressräume nachgebildet
    - Die meisten BS verwenden eh nur Ring 0 und Ring 3
- Neue IA-32 CPUs unterstützen Virtualisierung in HW (↪ VL 6)
  - Paravirtualisierung ist jedoch in der Praxis performanter



## ■ Anwendungsorientierte Kriterien

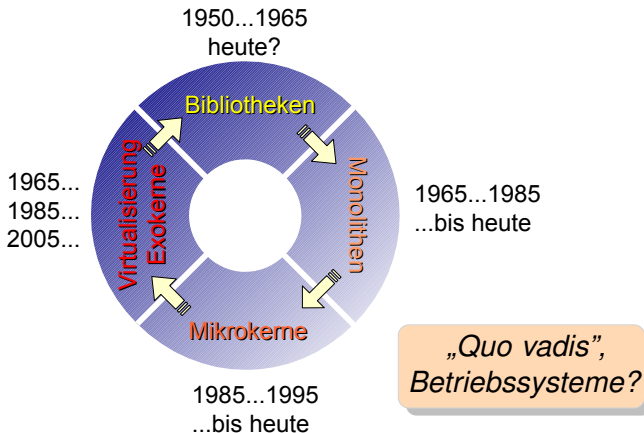
- **Portabilität** gering
  - sehr hardware-spezifisch, Paravirtualisierung ist aufwändig
- **Erweiterbarkeit** keine
  - in den üblichen VMMs nicht vorgesehen
- **Robustheit** gut
  - grobgranular auf der Ebene von VMs
- **Leistung** mäßig – gut
  - stark abhängig vom Einsatzszenario (CPU-lastig, IO-lastig, ...)

## ■ Technische Kriterien (Architektureigenschaften)

- **Isolationsmechanismus** VM, Paravirtualisierung
  - Jede Instanz bekommt einen eigenen Satz an Hardwaregeräten
- **Interaktionsmechanismus** nicht vorgesehen
  - Anwendungen in den VMS kommunizieren miteinander über TCP/IP
- **Unterbrechungsmechanismus** Weiterleitung an VM
  - VMM simuliert Unterbrechungen in den einzelnen VMs



*Back where we started?*



# Agenda

---

- Einführung
- Geschichte, Mode und Trend
- **Aktuelle Entwicklungen**
- Zusammenfassung
- Referenzen

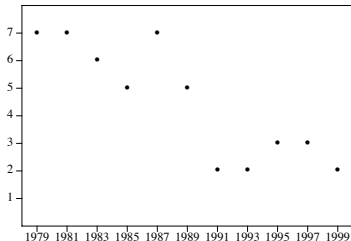


# Betriebssysteme $\mapsto$ ausgeforscht?

## „Systems Software Research is Irrelevant“ [12]

Urgestein Robert Pike (2000), einer der Entwickler von UNIX, Inferno [7], Plan 9 [13] und UTF-8 (zur Zeit bei Google beschäftigt):

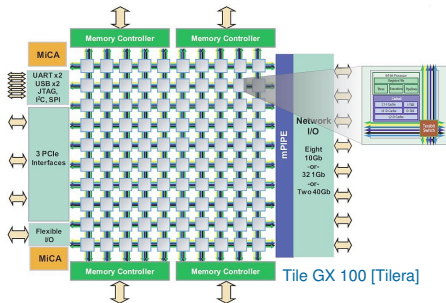
- Where is the innovation?  $\leadsto$  Microsoft, mostly
- Every other „new“ OS ends up being UNIX
- Linux?  $\leadsto$  Just another copy of the same old stuff
- ...



New Operating Systems at SOSP [12]

Aber dann...

*The Multicore  
Challenge!*





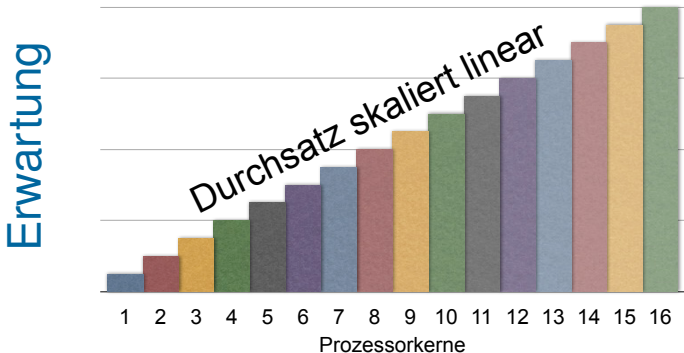
## ■ Boyd-Wickizer et al. (OSDI 2008)

[4]

- Linux 2.6.25 auf 16-Kern AMD Opteron, 1–16 Kerne in Gebrauch
- Pro Kern ein Faden, der Dateideskriptoren anfordert und freigibt:

```
int f = open(...); while(1){ close( dup( f ) ); }
```

Dateideskriptortabelle: # dup/close pro Sekunde



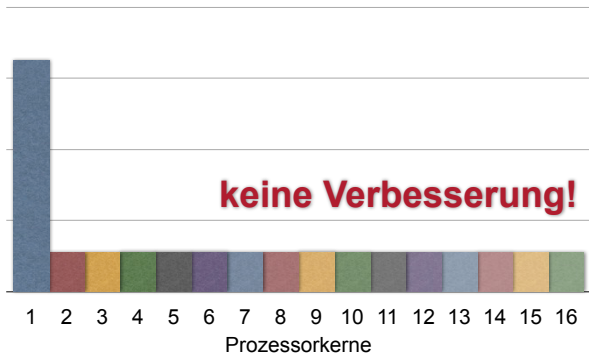
## ■ Boyd-Wickizer et al. (OSDI 2008) [4]

- Linux 2.6.25 auf 16-Kern AMD Opteron, 1–16 Kerne in Gebrauch
- Pro Kern ein Faden, der Dateideskriptoren anfordert und freigibt:

```
int f = open(...); while(1){ close( dup( f ) ); }
```

Dateideskriptortabelle: # dup/close pro Sekunde

Realität

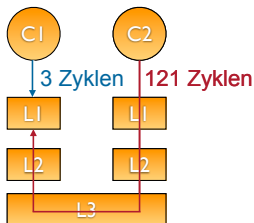


- Boyd-Wickizer et al. (OSDI 2008) [4]
  - Linux 2.6.25 auf 16-Kern AMD Opteron, 1–16 Kerne in Gebrauch
  - Pro Kern ein Faden, der Dateideskriptoren anfordert und freigibt:  

```
int f = open(...); while(1){ close( dup( f ) ); }
```
- Ergebnis: Schon ab **2 Kernen sinkt** der Gesamtdurchsatz
  1. Grobgranulares *Locking*  $\rightsquigarrow$  *false sharing*  $\rightsquigarrow$  keine Skalierbarkeit
  2. Geteilte Datenstruktur  $\rightsquigarrow$  *cache trashing*  $\rightsquigarrow$  Durchsatzabfall

```
fd_alloc () {  
    lock(fd_table);  
    fd = get_free_fd();  
    set_fd_used(fd);  
    fix_smallest_fd();  
    unlock(fd_table);  
}
```

1. *false sharing*



2. *cache trashing*

- Boyd-Wickizer et al. (OSDI 2008) [4]
  - Linux 2.6.25 auf 16-Kern AMD Opteron, 1–16 Kerne in Gebrauch
  - Pro Kern ein Faden, der Dateideskriptoren anfordert und freigibt:  

```
int f = open(...); while(1){ close( dup( f ) ); }
```
- Ergebnis: Schon ab **2 Kernen sinkt** der Gesamtdurchsatz
  1. Grobgranulares *Locking*  $\rightsquigarrow$  *false sharing*  $\rightsquigarrow$  keine Skalierbarkeit
  2. Geteilte Datenstruktur  $\rightsquigarrow$  *cache trashing*  $\rightsquigarrow$  Durchsatzabfall

**Multicore:** POSIX ( $\mapsto$  UNIX) considered harmful!

„This problem is not specific to Linux, but is **due to POSIX semantics**, which require that a new file descriptor be visible to all of a process's threads even if only one thread uses it.” [4]



# Folgerung: Wir brauchen neue Entwurfsansätze!

- **Corey** MIT, OSDI 2008, Exokern-artig: [4]
  - *Sharing* unter die Kontrolle der Applikation stellen
  - Datenstrukturen (im Normalfall) nur von einem Kern aus bearbeiten
  - Anwendungen müssen angepasst werden
- **Barrelfish** ETH/MSR, SOSP 2009, Mikrokern-artig: [3]
  - BS als verteiltes System von Kernen verstehen und organisieren
  - kein implizites *Sharing*, Kommunikation nur über Nachrichten
- **Factored OS (fos)** MIT, 2009, Mikrokern-artig: [17]
  - BS für 100 bis 1000 Kerne  $\leadsto$  *time sharing* wird zu *space sharing*
  - Letztlich ähnlicher Ansatz wie Barrelfish
- **TxOS** UT, SOSP 2009, Monolith (Linux): [15]
  - Konkurrenz zulassen durch *transactional syscalls* (statt *Locks*)
  - Anwendungen müssen angepasst werden



- Boyd-Wickizer et al. (OSDI 2010) [5]
  - “An Analysis of Linux Scalability to Many Cores”
  - Skalierbarkeit von Linux 2.6.35-rc5 auf 48-Kern AMD Opteron
- Ansatz: *run* – *analyze* – *fix*
  - *run*: sieben „systemintensiven“ Anwendungen
    - Exim, memcached, Apache, PostgreSQL, gmake, Psearchy, MapReduce
  - *analyze*: gezielte Identifizierung von Flaschenhälsen
    - im Linux-Kern selber (16)
    - im Entwurf der Anwendung
    - durch die ungeschickte Verwendung der Systemschnittstelle
  - *fix*: Verbesserung, überwiegend durch Standardtechniken der parallelen Programmierung (↪ [PFP])



**Ergebnis:** Alles nicht so schlimm...

*„We find that we can remove most kernel bottlenecks that the applications stress by modifying the applications or kernel slightly. [...] the results suggest that **traditional kernel designs may be compatible with achieving scalability** on multicore computers.” [5]*

**Fazit**

# Es bleibt spannend!

Mehr zum Thema Systementwurf für Skalierbarkeit nächstes Semester in [BST].



# Agenda

---

- Einführung
- Geschichte, Mode und Trend
- Aktuelle Entwicklungen
- **Zusammenfassung**
- Referenzen





- Betriebssysteme sind ein unendliches Forschungsthema
  - „alte“ Technologien (wie Virtualisierung oder Bibliotheken) finden immer wieder neue Einsatzgebiete
  - Hardwaretechnologie treibt die weitere Entwicklung
- Revolutionäre Neuerungen sind schwer durchzusetzen
  - Kompatibilität ist ein hohes Gut
    - Auf Anwendungsebene durch *Personalities* erreichbar
    - Neue Systeme scheitern jedoch meistens an fehlenden Treibern
  - Virtualisierte Hardware als Kompatibilitätsebene
- Die „ideale“ Architektur ist letztlich eine Frage der Anwendung!
  - Sensornetze, tief eingebettete Systeme  
Desktoprechner, Server, ...
  - Architektur → nichtfunktionale Eigenschaft des Betriebssystems



- [1] Mike Accetta, Robert Baron, David Golub, et al. “MACH: A New Kernel Foundation for UNIX Development”. In: *Proceedings of the USENIX Summer Conference*. USENIX Association, 1986, pp. 93–113.
- [2] Paul Barham, Boris Dragovic, Keir Fraser, et al. “Xen and the Art of Virtualization”. In: *Proceedings of the 19th ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP '03)*. Vol. 37, 5. ACM SIGOPS Operating Systems Review. New York, NY, USA: ACM Press, Oct. 2003, pp. 164–177. DOI: 10.1145/945445.945462.
- [3] Andrew Baumann, Paul Barham, Pierre-Evariste Dagand, et al. “The multikernel: a new OS architecture for scalable multicore systems”. In: *Proceedings of the 22nd ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP '09)*. Big Sky, Montana, USA: ACM Press, 2009, pp. 29–44. ISBN: 978-1-60558-752-3. DOI: 10.1145/1629575.1629579.
- [4] Silas Boyd-Wickizer, Haibo Chen, Rong Chen, et al. “Corey: An Operating System for Many Cores”. In: *8th Symposium on Operating System Design and Implementation (OSDI '08)*. San Diego, California: USENIX Association, 2008, pp. 43–57.
- [5] Silas Boyd-Wickizer, Austin T. Clements, Yandong Mao, et al. “An Analysis of Linux Scalability to Many Cores”. In: *9th Symposium on Operating System Design and Implementation (OSDI '10)*. Vancouver, Canada, 2010.



- [6] Fred Brooks. *The Mythical Man Month*. Addison-Wesley, 1975. ISBN: 0-201-00650-2.
- [7] Sean Dorward, Rob Pike, Dave Presotto, et al. “The Inferno Operating System”. In: *Bell Labs Technical Journal* 2.1 (1997).
- [8] Dawson R. Engler, M. Frans Kaashoek, and James O’Toole. “Exokernel: An Operating System Architecture for Application-Level Resource Management”. In: *Proceedings of the 15th ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP ’95)*. ACM SIGOPS Operating Systems Review. ACM Press, 1995, pp. 251–266. DOI: 10.1145/224057.224076.
- [9] Hermann Härtig, Michael Hohmuth, Jochen Liedtke, et al. “The Performance of  $\mu$ -Kernel-Based Systems”. In: *Proceedings of the 16th ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP ’97)*. New York, NY, USA: ACM Press, 1997. DOI: 10.1145/269005.266660.
- [10] Gerwin Klein, Kevin Elphinstone, Gernot Heiser, et al. “seL4: formal verification of an OS kernel”. In: *Proceedings of the 22nd ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP ’09)*. Big Sky, Montana, USA: ACM Press, 2009, pp. 207–220. ISBN: 978-1-60558-752-3. DOI: 10.1145/1629575.1629596.



- [11] Jochen Liedtke. "On  $\mu$ -Kernel Construction". In: *Proceedings of the 15th ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP '95)*. ACM SIGOPS Operating Systems Review. ACM Press, Dec. 1995. DOI: 10.1145/224057.224075.
- [PFP] Michael Philippsen and Norbert Oster. *Parallele und Funktionale Programmierung*. Vorlesung mit Übung. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Informatik 2, 2009 (jährlich). URL: <http://www2.informatik.uni-erlangen.de/teaching/WS2009/PFP/index.html>.
- [12] Rob Pike. *Systems Software Research is Irrelevant*. Talk. CS Colloquium, Columbia University. URL: <http://herpolhode.com/rob/utah2000.pdf> (visited on 12/09/2010).
- [13] Rob Pike, Dave Presotto, Sean Dorward, et al. "Plan 9 from Bell Labs". In: *Computing Systems* 8.3 (1995), pp. 221–254.
- [14] Gerald J. Popek and Robert P. Goldberg. "Formal Requirements for Virtualizable Third Generation Architectures". In: *Communications of the ACM* 17.7 (1974), pp. 412–421. ISSN: 0001-0782. DOI: 10.1145/361011.361073.
- [15] Donald E. Porter, Owen S. Hofmann, Christopher J. Rossbach, et al. "Operating System Transactions". In: *Proceedings of the 22nd ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP '09)*. Big Sky, Montana, USA: ACM Press, 2009, pp. 161–176. ISBN: 978-1-60558-752-3. DOI: 10.1145/1629575.1629591.



- [BST] Wolfgang Schröder-Preikschat. *Betriebssystemtechnik*. Vorlesung mit Übung. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Informatik 4, 2010 (jährlich). URL:  
[http://www4.informatik.uni-erlangen.de/Lehre/SS10/V\\_BST](http://www4.informatik.uni-erlangen.de/Lehre/SS10/V_BST).
- [16] Jim Smith and Ravi Nair. *Virtual Machines. Versatile Platforms for Systems and Processes*. Elsevier, 2005. ISBN: 978-1558609105.
- [17] David Wentzlaff and Anant Agarwal. "Factored operating systems (fos): the case for a scalable operating system for multicores". In: *ACM SIGOPS Operating Systems Review* 43 (2 2009), pp. 76–85. ISSN: 0163-5980. DOI: 10.1145/1531793.1531805.

