G Betriebssystemarchitekturen

G.1 Entwicklung der Betriebssystemstrukturierung

Monolithische Kerne

- Entstanden nach den ersten Batch-Systemen Anfang der 60er Jahre
- Unangefochtenes Konzept bis Mitte der 80er Jahre
- Beispiele: MVS, UNIX, VMS, BS2000

Minimalkerne

- Erste Ideen in der ersten Hälfte der 80er Jahre
- Erste produktreife Systeme seit 1989/1990
- Beispiele: MACH, Amoeba, (Windows-) NT, Chorus

Objektbasierte, offene Betriebssysteme

- Forschung seit Mitte der 80er Jahre (siehe auch [HSE91])
- Mehrere lauffähige Prototypen als Forschungsergebnisse
- Bislang keine Produkte auf dem Markt
- Beispiele: Choices, Clouds [DLA+91], APERTOS [Yok92], Spring [HaK93]

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

1 Literatur

BAL+90. B. N. Bershad, T. E. Anderson, E. D. Lazowska and Henry M. Levy, “Lightweight Remote Procedure Call”, *ACM Transactions on Computer Systems*, Vol. 8, No. 1, pp. 37-55, Feb. 1990.

Dei90. H. M. Deitel, *Operating Systems*, 2nd Ed., Addison-Wesley, Reading (MA), 1990

DLA+91. P. Dasgupta, R. J. LeBlanc, M. Ahamed and U. Ramachandran, “The CLOUDS Distributed Operating System”, *IEEE Computer*, Apr. 1991.

HaK93. G. Hamilton and P. Kougiouris, "The Spring nucleus: A micokernel for objects", Proceedings of the *Summer 1993 USENIX Technical Conference*, pp. 147 - 159, Cincinnati (OH, USA), Jun. 1993.

HSE91. F. Hofmann, P. Schlenk, T. Eirich, “Encapsulation and Interaction in Future Operating Systems”, *Workshop on Operating Systems for the 90s and Beyond*, pp. 241-246, Dagstuhl (Germany), Eds. A. Karshmer and J. Nehmer, Lecture Notes in Computer Science No. 563, Springer-Verlag, 1991.

Laz93. E. Lazowska, "Recent Trends in Experimental Operating Systems Research", *Proceedings of the Twelfth Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*, pp. 13 - 19, Ithaka (NY, USA), Aug. 1993.

Tan92. Andrew S. Tanenbaum, *Modern Operating Systems*, Prentice-Hall Inc., Englewood-Cliffs (NJ), 1992.

Yok92. Yasuhiko Yokote, “The Apertos Reflective Operating System: The Concept and Its Implementation”, *OOPSLA ’92 – Conference Proceedings*, pp. 414-434, Vancouver (BC, Canada), published as *SIGPLAN Notices*, Vol. 27, No. 10, Oct. 1992.

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

G.2 Monolithische Betriebssystemkerne

- Alle Betriebssystemkomponenten zu einem Kern zusammengefasst
  - Programmierung
    - bis Anfang der 70er Jahre ausschließlich in Assembler
    - beginnend mit UNIX wesentliche Teile auch in höheren Programmiersprachen (Vor allem C, aber auch Sprachen, die von Rechnerherstellern explizit für die Betriebssystemprogrammierung entwickelt wurden)
  - Bindung
    - statisch: alle Betriebssystemkomponenten werden zusammengebunden — der Kern wird "am Stück" gebootet
    - dynamisch: beim Booten wird nur ein Teil der Betriebssystemkomponenten geladen, weitere Moduln können während der Laufzeit dynamisch nachgeladen werden (inzwischen bei vielen Systemen - z. B. Solaris, Linux, …)
  - Kapselung
    - Alle Betriebssystemfunktionen sind in einem virtuellen Adressraum zusammengefasst
- Ausführung generell im privilegierten Modus
  - Benutzerschnittstelle
    - SVC (Supervisor-Call) = spezieller Maschinenbefehl, der einen Wechsel des PSW bewirkt. Dadurch kontrollierter Einsprung in das Betriebssystem. Anschließend Umschalten der Schutzumgebung (virtueller Adressraum) auf den Adressraum des Betriebssystems.

1 Vorteile

+ Effiziente Kommunikation zwischen den Komponenten des Kerns durch Prozeduraufrufe
  - Da alle Betriebssystemfunktionen in einem Adreßraum zusammengefasst sind, können sie sich gegenseitig direkt adressieren (= normaler Unterprogrammaufruf)
+ Direkter Zugriff auf alle Datenstrukturen des Kerns jederzeit möglich
  - Kern-Datenstrukturen können einfach als globale Daten angelegt werden und sind damit aus allen Unterprogrammen heraus direkt zugreifbar → sehr effizient
+ Privilegierte Befehle jederzeit aufrufbar
  - Da alle Kern-Funktionen im Supervisor-Modus ausgeführt werden, können privilegierte Befehle jederzeit ausgeführt werden und geschützte Adressbereiche und Register (z. B. von E/A-Geräten) direkt angesprochen werden

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2 Nachteile

– Mechanismen strikt vorgegeben; individuelle Anpassung an Anwendungen, Erweiterung oder Reduzierung nicht möglich
  - Da die meisten monolithischen Betriebssystemkerne statisch gebunden sind, ist zur Laufzeit keine Änderung möglich.
  - Selbst wenn ein System ein Nachladen von Modulen ermöglicht, sind die Beeinflussungsmöglichkeiten nicht sehr groß: in der Regel können nur zusätzliche Treiber oder Teile, die über sehr flexibel konfigurierbare Schnittstellen innerhalb des Betriebssystems angesprochen werden (z. B. Dateisystem), nachgeladen oder sogar ausgetauscht werden.

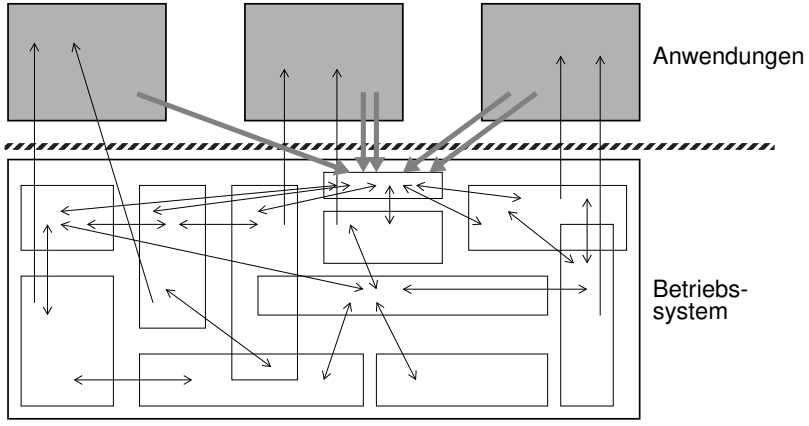
– Strukturierung meist schlecht → änderungsunfreundlich und fehleranfällig
  - Durch die Programmierung in Assembler oder in maschinennahen höheren Programmiersprachen war bei den meisten Betriebssystemen kein Zwang zu guter Strukturierung und strenger Modularisierung vorgegeben.
  - Hohe Effizienzanforderungen haben häufig dazu geführt, dass intensiv Seiteneffekte ausgenutzt wurden — insbesondere durch direkten Zugriff auf zentrale Datenstrukturen des Systems. Bei Änderungen ist es daher oft schwierig, alle Stellen im Betriebssystem zu finden, die von dieser Änderung betroffen sind.

– Kein Schutz gegenüber Kernkomponenten möglich (kritisch z. B. bei zugekauften Treibern!)
  - Da alle Betriebssystemfunktionen im privilegierten Modus ausgeführt werden, gibt es keinerlei Schutzmechanismen.
    - Durch Programmierfehler können dadurch leicht andere Systembereiche zerstört werden → Systemabsturz.
    - Während Anwenderprogramme bei den meisten Systemen im nicht-privilegierten Benutzer-Modus ausgeführt werden und damit den Schutzmechanismen des Betriebssystems unterworfen sind, kann sich das Betriebssystem nicht gegen Software schützen, die zu dem Betriebssystem hinzugebunden wurde (z. B. ein Treiber für ein spezielles E/A-Gerät). Solche Software kann potentiell beliebigen Schaden anrichten.

– Niedriges Abstraktionsniveau
  Programmierung “direkt auf der nackten Hardware”
  - Anwendungsprogramme bauen auf den Abstraktionen des Betriebssystems (z. B. Dateien, Prozesse, Signale) auf. Der Programmierkomfort wird durch diese vom Betriebssystem bereitgestellten Abstraktionen erheblich verbessert.
  - Bei der Programmierung des Betriebssystems selbst stehen solche Abstraktionen natürlich noch nicht zur Verfügung — einzige Basis sind die Maschinenbefehle der Hardware. Zugriffe auf Betriebssystemabstraktionen können höchstens durch direkte Manipulation der entsprechenden Kern-Datenstrukturen erfolgen.

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

3 Gesamtablauf



billige, ungeschützte Interaktion
teuere, gesicherte Interaktion
Anwendung
Betriebssystemfunktion

- Anwendungen erreichen den Systemkern nur über eine zentrale Einsprung-Stelle (trap-Handler oder SVC-Handler)
  - hierbei muss auf den virtuellen Adreßraum des Betriebssystems umgeschaltet werden (und nach Ende des Systemaufrufs wieder zurück auf den virtuellen Adressraum der Anwendung) — dadurch relativ teuer
- Anwendungen können untereinander nur mit Hilfe von Betriebssystemmechanismen kommunizieren — müssen also immer durch das Betriebssystem hindurch
- Betriebssystemfunktionen können sich direkt aufrufen (weil im gleichen virtuellen Adressraum)
- Betriebssystemfunktionen haben direkten Zugriff auf die Daten von Anwendungen (und nutzen diesen auch, um z. B. Daten zwischen Anwendungen zu übertragen oder Ergebnisse von Betriebssystemdiensten zurückzuliefern — beispielsweise die Zeichen, die im Rahmen eines read-Systemaufrufs gelesen wurden)
  - hierbei muss normalerweise nicht der virtuelle Adreßraum umgeschaltet werden (da das Betriebssystem im privilegierten Modus ausgeführt wird, stehen entweder Maschinenbefehle zur Verfügung, die einen direkten Zugriff auf den physischen Hauptspeicher ermöglichen oder die benötigten Datenbereiche können in den virtuellen Adressraum des Betriebssystems abgebildet werden)
    → billige Datenübertragung

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

G.3 Minimalkerne

- Auslagerung von Betriebssystemkomponenten
  - Viele monolithische Kerne sind im Laufe jahrelanger Erweiterungen um sehr viele Funktionen ergänzt worden, die zwar einfach im Kern implementierbar sind, eigentlich aber nicht im privilegierten Modus ausgeführt werden müßten.
  - Beispiele:
    - Netzwerkkommunikationsprotokolle wie TCP/IP
    - Editorfunktionen (*Line-Editing*) im Terminaltreiber
    - unterschiedliche Dateisystemimplementierungen

  → Platzierung der Komponenten in eigenen Adressräumen
  - Betriebssystemfunktionsgruppen (z. B. ein Dateisystem) werden zusammengefasst und aus dem Systemkern ausgelagert.
  - Systemaufrufe, die von solch einer Funktionsgruppe auszuführen sind, werden von Anwendungen direkt an die ausgelagerte Funktionsgruppe gerichtet (als normale Interprozesskommunikation).

  → Ausführung im Benutzermodus
  - Solange eine ausgelagerte Funktionsgruppe keine privilegierten Befehle ausführen bzw. auf privilegierte Register (z. B. Controller-E/A-Register) zugreifen muss, ist es nicht notwendig, sie im Supervisor-Modus auszuführen — sie kann wie eine "ganz normale Anwendung" gestartet werden.

- Reduktion des Kerns auf Basisfunktionalität und die Mechanismen, für die privilegierter Modus notwendig ist
  - Um auf einem Minimalkern vollständige Betriebssystemmechanismen aufzubauen, reichen im wesentlichen die folgenden Funktionen aus:
    - Interprozesskommunikationsunterstützung
    - einfache Speicherverwaltung
    - Einfache Prozessverwaltungs- und Schedulingmechanismen
    - grundlegende E/A-Funktionen

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

1 Vorteile

+ Bessere Modularisierung

+ Ausgelagerte Teile leichter individuell zu gestalten

  ➔ zusätzlich angepasste Module erzeugbar

  - Es kann beispielsweise ein zusätzliches Dateisystemmodul gestartet werden, das spezielle Funktionalität für eine Anwendung bereitstellt.

  ➔ nicht benötigte Module können einfach weggelassen werden

+ Ausgelagerte Teile werden nicht privilegiert ausgeführt
  → mehr Sicherheit

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2 Nachteile

– Kommunikation zwischen Modulen teuer
  (RPC, 20- bis 70-facher Aufwand eines Prozeduraufrufs)

  - Mechanismen, die bisher innerhalb des Systemkerns in Form eines Prozeduraufrufs angesprochen werden konnten, müssen jetzt über Adreßraumgrenzen hinweg aufgerufen werden (= Interprozesskommunikation oder Remote Procedure Call).
    – es werden Adressraumumschaltungen notwendig (teuer, da die TLBs — Translation Lookaside Buffer, Cache der MMU für Einträge der Seitenkacheltabelle — ausgewechselt werden müssen)
    – an der University of Washington wurden Untersuchungen zur Optimierung von RPCs durchgeführt [BAL+90] — bei sehr intensiver Optimierung betrugen die Kosten für einen adressraumübergreifenden Prozeduraufruf immer noch das 20-fache eines lokalen Prozeduraufrufs.

  ➔ Module werden aus Effizienzgründen möglichst groß gehalten
  - Wenn zwischen zwei Betriebssystemkomponenten sehr intensive Kommunikation stattfindet, ist es aus Effizienzgründen nicht vertretbar, die Komponenten in separate Adressräume zu plazieren.

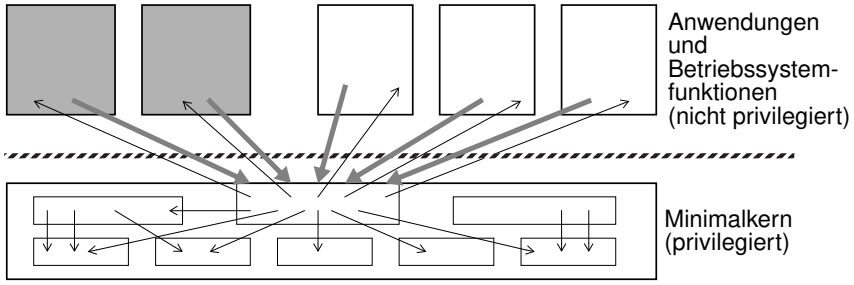
  ➔ innerhalb der Module Strukturierung beliebig
  - Wenn unterschiedliche Funktionsgruppen aus Effizienzgründen zu einem Modul zusammengefasst werden, liegt es nahe, innerhalb dieses Moduls wieder mit gemeinsamen Datenstrukturen, Seiteneffekten, etc. zu arbeiten — man erhält die gleichen Probleme wie in einem monolithischen Kern.

  ➔ aus Effizienzgründen verbleiben Komponenten im Minimalkern, die nicht dorthin gehören
  - Komponenten, die intensiv von Funktionen des Minimalkerns genutzt werden, werden — um Adressraumumschaltungen zu vermeiden — zwangsläufig wieder zu dem Minimalkern dazugebunden werden müssen.
    – der Minimalkern wird größer, als er eigentlich sein müsste
  - Innerhalb des Minimalkerns ist ebenfalls kein Zwang zu guter Modularisierung vorgegeben, die Nutzung gemeinsamer Datenstrukturen und die Bildung von Seiteneffekten wird nicht unterbunden
  - Durch die Auslagerung wesentlicher Kernkomponenten wie
    – Dateisystem
    – Netzwerkkommunikation
    – Prozessverwaltung

    wird der Systemkern zwar verkleinert, die grundsätzlichen Probleme sind aber unverändert.

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

3 Gesamtablauf



billige, ungeschützte Interaktion
teuere, gesicherte Interaktion
Anwendung
Betriebssystemfunktion

- Die zentrale Funktion des Minimalkerns ist die Bereitstellung von Interprozesskommunikationsmechanismen.
- Kommunikation zwischen Anwendungen sowie zwischen Anwendungen und Kernkomponenten funktioniert gleich — immer unter Vermittlung des IPC-Moduls im Minimalkern.

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

G.4 Objektbasierte, offene Betriebssysteme

- Fortführung des Wegs 'monolithischer Kern → Minimalkern'
  - Der Übergang vom monolithischen Kern zu den Minimalkernen führte zu einer groben Modularisierung des Betriebssystems.
  - Minimalkern und ausgelagerte Betriebssystemmodule sind jeweils gekapselt, Interaktion zwischen diesen Komponenten ist nur über die dafür definierten Schnittstellen (RPC oder *message passing*) möglich.
  - Aus Effizienzgründen kann in einer Minimalkernarchitektur nur eine grobe Modularisierung vorgenommen werden, wobei zu beachten ist, daß intensive Interaktionen nicht über Modulgrenzen hinweg erfolgen.

- Weitere Modularisierung nur möglich, wenn Inter-Modul-Kommunikationskosten reduziert werden
  - ➔ Adressraumkapselung muss aufgegeben werden
    - Wenn unterschiedliche Module in einem Adressraum zusammengelegt werden, ist eine Inter-Modul-Kommunikation nicht wesentlich teurer als ein normaler Prozeduraufruf.
  - ➔ Verlust an Sicherheit
    - Es wird nun nicht mehr durch die Hardware (MMU) verhindert, daß ein Modul unberechtigt auf Daten anderer Module zugreift.
    - Fehler in einem Modul können damit wieder wie bei einem monolithische Kern das Gesamtsystem in Mitleidenschaft ziehen.
  - ➔ Sicherheit muß anders gewährleistet werden
  - ➔ Sprachebene + typsichere objektorientierte Programmierung
    - Die Programmiersprache erlaubt Interaktionen zwischen Modulen nur über definierte Schnittstellen und überprüft, dass die Module keine anderen Zugriffe auf die "Außenwelt" durchführen.
    - Die Beziehungen zwischen Modulen werden damit konsequent auf die Modulschnittstellen beschränkt — bei Änderungen oder Erweiterungen des Gesamtsystems wird dadurch die Gefahr unbeabsichtigter Nebenwirkungen reduziert.

- Wenn Sicherheit auf Sprachebene garantiert wird, kann auf Adreßraumgrenzen verzichtet werden, sonst nicht!
  - kann für ein Modul "Wohlverhalten" gengenüber anderen Modulen nicht garantiert werden, kann es aus Sicherheitsgründen in einen anderen Adreßraum "eingesperrt" werden.
  - ➔ gleiche Modul-Interaktion Adreßraum-lokal und Adreßraum-übergreifend wünschenswert
    - Bei einer einheitlichen Schnittstelle für lokale und Adreßraum-übergreifende Modulinteraktion (d. h. syntaktische und semantische Übereinstimmung!) muß der Programmierer die Fälle nicht mehr explizit unterscheiden.
    - Module können auch später ohne Programmänderungen noch verlagert werden.

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.