

Betriebssystemtechnik

Adressräume: Trennung, Zugriff, Schutz

IX. Adressraummodelle: Einadressraumsysteme

Wolfgang Schröder-Preikschat / Volkmar Sieh

14. Juni 2023



Einadressraumsystem

Einleitung

Rückblick

Modell

Adressierung

Schutz

Gedankenspiel

Diskurs

Zusammenfassung



- Einadressraumkonzept
 - Betriebssystem und Anwendungsprogramme teilen sich einen Adressraum
 - der logische Adressraum zeichnet sich nicht mehr als Schutzdomäne aus
 - Adressen werden eine bestimmte **Befähigung** (*capability*) zugeschrieben
 - erzeugt, zugeteilt, verwaltet, entzogen, zerstört durch das Betriebssystem
 - Prozesse greifen damit auf *sämtliche* Objekte des Rechensystems zu
- Adressen haben eine eindeutige Interpretation
 - für alle Anwendungsprogramme, für potentiell alle Zeiten
 - virtuelle Adressen sind **kontextunabhängig**
 - sie lösen dieselben Daten auf, unabhängig davon, wer sie verwendet
- Prozesse können alle Daten im System benennen, haben jedoch für gewöhnlich nicht das Recht, auf alle diese Daten zuzugreifen
 - die **Schutzdomäne**, in der ein Prozess läuft, definiert seine Zugriffsrechte
 - beschränkt seinen Zugriff
 - auf einen bestimmten Satz von Seiten zu einem bestimmten Zeitpunkt



Eigenschaften von Mehradressraumsystemen, die (total/partiell) **private Adressräume** implementieren:

- **partielle Virtualisierung** [4, 17] der Prozessadressräume
 - Vergrößerung der verfügbaren Menge von Adressräumen
 - Einrichtung harter Speicherschutzgrenzen
 - Aufräumen, wenn Programme aussteigen, gestaltet sich einfach

- Erschwernis der Kooperation zwischen den Anwendungsprogrammen:
 - Zeiger sind außerhalb der Grenze/Lebenszeit von Prozessen bedeutungslos
 - zeigerbasierte Information mitbenutzen, speichern, übertragen ist schwer
 - der hauptsächliche Kooperationsmechanismus greift auf Kopieren zurück
 - und geht ggf. auch einher mit der Konvertierung in eine kanonische Form

- Mitbenutzung von Informationen nur auf „Umwegen“ möglich
 - Konsequenz aus der strikten Isolation von Anwendungskomponenten
 - bereits die Gemeinschaftsbibliothek (*shared library*) fällt aus dem Rahmen



Einadressraumsystem

Einleitung

Rückblick

Modell

Adressierung

Schutz

Gedankenspiel

Diskurs

Zusammenfassung



Trennung von Belangen (*separation of concerns* [8, S. 1])

■ Adressierung einerseits

- Adressen sind eindeutig und potentiell für immer gültig
- darüber hinausgehend sind Adressen kontextunabhängig
 - sie lösen jederzeit zu demselben Datum auf
 - unabhängig davon, welcher Aktivitätsträger sie benutzt/generiert
- ein Programmfaden kann jedes Datum im System darüber „benennen“

■ Schutz andererseits

- nicht jedes vom Programmfaden adressierte Datum ist von ihm zugreifbar
- vielmehr definiert die Schutzdomäne eines Fadens seine Zugriffsrechte
 - Begrenzung des Zugriffs/der Zugriffsart auf einen bestimmten Adressbereich
 - permanent oder zeitlich beschränkt
- Zugriffsrechte ändern sich beim Durchwandern von Schutzdomänen

↪ seit Multics [6] ist beides (oft) mit dem Begriff „Prozess“ verbunden
— genau genommen: „Prozessexemplar“



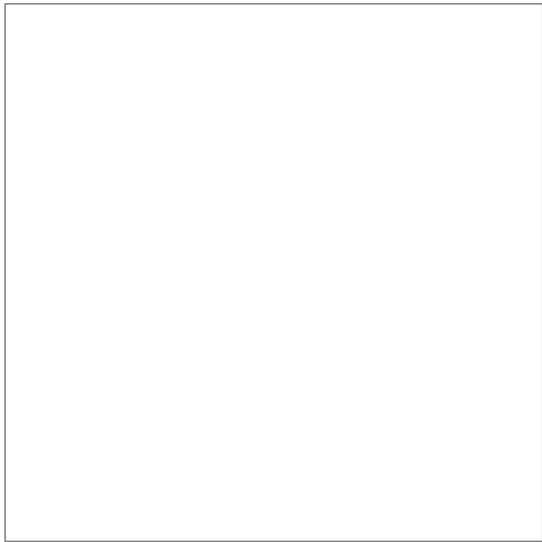
Prozessoren mit breiten Adressen fördern den Einadressraumansatz, da sie den Zwang zur Wiederverwendung von Adressen aufgeben

- ein solcher Zwang besteht für 32-Bit – und kleineren – Architekturen
- für 64-Bit Architekturen können Adressen auf immer gültig bleiben:

A full 64-bit address space will last for 500 years if allocated at the rate of one gigabyte per second. [3, S. 272]

- ausschlaggebend ist der von Programmfäden sichtbare **Namensraum**
 - gegeben durch die Anzahl der von ihnen technisch aufzählbaren Adressen
 - die tatsächlich in der Hardware implementierte Adressbreite ist belanglos
 - wenn also z.B. nur max. 44-Bit breite reale Adressen möglich sind
 - auch hier ist die **Virtualität** von 64-Bit Adressen der wesentliche Punkt
- der sämtliche im Rechengesystem referenzierbare Eintitäten umfasst



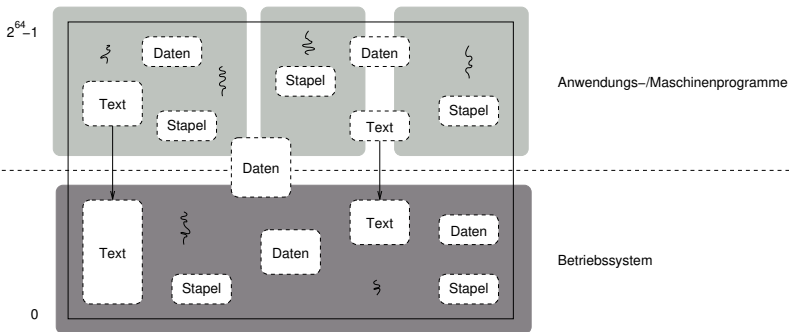


*Man könnte den ganzen Hauptspeicher
buchstäblich im 64-Bit-Raum verstecken
und er würde nie gefunden werden.*

*In einem sehr großen, spärlichen Adress-
raum kann die virtuelle Adresszuordnung
als Befähigung (capability) gelten [24].*



„Hyperadressraum“ mit Schutzdomänen



- horizontaler und vertikaler Informationsaustausch
 - horizontal ■ Unterprogrammaufrufe, gemeinsame Adressbereiche
 - vertikal ■ *dito*, System-Calls
- mikrokernbasierte Beispiele von Betriebssystemen der Art:
 - Opal [3] ■ Mach, System- und Fernaufrufe [16] über Portale
 - Mungi [13] ■ L4, Interaktion nur über gemeinsame Adressbereiche



Paradigma der Adressierung, bei dem alle adressierbaren Einheiten dem Programm als einzelner **linearer Adressraum** erscheint

- **eindimensionaler Adressraum** im Stile von **Seitenadressierung**
 - sämtliche (*online*) Information im System kann direkt referenzierbar sein¹
 - gebündelt als **logische Segmente**, erfasst durch **logische Deskriptoren**
- jede Entität ist als (**seitennummeriertes**) **Segment** ausgeprägt
 - das durch einen/mehrere Seitendeskriptor/en repräsentiert ist
 - für alle Prozesse angelegt in einer geeigneten Tabellenstruktur
 - 5-stufige Seitentabelle, invertierte Seitentabelle, . . . , *guarded page table* [15]
- gemeinsame Nutzung setzt die Weitergabe ihrer Adressen voraus
 - dieselben Adressen selektieren denselben Deskriptor: **dieselben Attribute**
 - verschiedene Prozesse erhalten darüber auch nur dieselben Zugriffsrechte
- Differenzierung von Zugriffsrechten erfordert zusätzliche Maßnahmen
 - i Replikation, Anpassung und Gruppierung von Deskriptoren
 - ii Segmente mit einer **Befähigung** (*capability*, [7]) assoziieren

¹Erstmalig realisiert mit Multics [18], aber durch physische Segmentierung.



Bereiche, die 2^{64} Adressen umfassen, sind so groß, dass die einzelnen darin enthaltenen Entitäten (Objekte) nicht mehr aufzählbar sind²

- damit sind diese Entitäten bereits sehr gut vor Zugriffen geschützt
 - man muss ihre Adresse schon kennen, sie zu erraten ist hoffnungslos
 - die **Wahrscheinlichkeit**, eine unbekannte Entität zu erreichen, ist gering
- dieser Schutz lässt sich durch **Randomisierung** weiter verfeinern
 - die Platzierungsstrategie liefert die Adresse im „winzigen“ Hauptspeicher
 - diese reale Adresse ist einer logischen/virtuellen Adresse zuzuordnen
 - das Betriebssystem nimmt die **Adressabbildung** (*address mapping*) vor
 - bei Seitenadressierung ist der Adresswert ein Vielfaches der Seitengröße
 - die zugeordnete Adresse wäre ein zufälliger Wert im Bereich $[0, 2^n - 1]$
 - mit $n \leq 2^{64-p}$, wobei $p = \log_2(\text{Seitengröße})$
 - sowie $n/\text{Seitengröße} = 0$, also ein seitenausgerichteter Wert
- die Adresse n muss anderen Prozessen explizit kommuniziert werden, damit sie auf die betreffende Entität zugreifen können

²Angenommen, ein Zähler schritt dauert 1 ns. Dann muss der Rechner etwa 584,9 Jahre durchgängig im Betrieb sein, um alle 2^{64} Adressen aufzuzählen.



- `mmap(2)` mit der gewöhnlichen (Linux-) Semantik ist ein Problem
 - durch Anforderung hinreichend großer Bereiche, lässt sich relativ schnell ein 64-Bit-Raum „abtasten“
 - beispielsweise 4GB große Bereiche
 - dann ist der 64-Bit-Raum mit höchstens 2^{32} Systemaufrufen abgesucht ☹
 - bei 1 ms pro 4GB Systemaufruf wäre der 64-Bit-Raum in 50 Tagen geprüft³
 - das ließe sich „rekursiv“ im „buddy“-Verfahren mit kleineren Einheiten verfeinern, falls die Erzeugung einer größeren Abbildung scheitert
 - so wäre es möglich, sich auf Seitengranularität an etwas heranzutasten ☹
 - das Betriebssystem könnte ein reguläres Muster dieses Systemaufrufs sehr ähnlich zu [5] erkennen und Gegenmaßnahmen ergreifen
 - aber ebenso könnte sich der „Angreiferprozess“ darauf einstellen ☹
- **Abwärtskompatibilität** zu bewahren, ist eine große Herausforderung
 - SAS ist **disruptiv**, soweit es Standardschnittstellen betrifft, die den Stand der Technik bei Betriebssystemen (POSIX) definieren (vgl. S. 21)

³Mit größeren Bereichen wie bspw. 256GB sind es nur noch 9 Stunden, ggf. lässt sich auch `MAP_NORESERVE` geeignet nutzen, um nur noch in Minuten durchzukommen. Andere Tricks zur „Nadelsuche“ sind in [10] beschrieben.

- Replikation, Anpassung und Gruppierung von **Deskriptoren**
 - für abweichende Zugriffsrechte, eigene Deskriptoren einrichten
 - bis auf Zugriffsrechte gleichen alle anderen Deskriptoreinträge dem Original
 - in einer eigenen Deskriptortabelle gruppieren \leadsto **Schutzdomäne** einrichten
- \hookrightarrow damit werden jedoch nur die typischen „Hardwarezugriffsrechte“ erfasst: zugreifen, lesen, schreiben, ausführen
- Adressen mit einer **Befähigung** (*capability*, [7]) assoziieren
 - allgemein Subjekten Rechte für Operationen auf Objekte zuschreiben [12]
 - Objekt** – Entität, zu der der Zugriff kontrolliert werden muss
 - Seiten, Segmente, Dateien, Programme, Geräte, Maschinenbefehle
 - Subjekt** – aktive Entität, deren Zugriff auf Objekte kontrolliert werden muss
 - Paar (*Prozess, Domäne*): Schutzdomäne, in der ein Prozess operiert
 - sicherstellen, dass die Rechtezuordnung nicht gefälscht werden kann !!!
- \hookrightarrow damit auch weitergehende, nicht nur einfache Zugriffe erfassende Rechte einräumen: übertragen, bewilligen, löschen, erzeugen, zerstören



Subjekte verfügen allein durch den Besitz einer Befähigung über die darüber definierten Rechte beim Objektzugriff

- Befähigungen sind daher selbst zu schützen, beispielsweise:
 - i als Liste (*capability list*, *C-list*, [7]) gespeichert in speziellen Segmenten, überwacht vom Betriebssystem
 - ii durch ein zusätzliches Kennwort [1], vergeben vom Objektverwalter bei Zuordnung der Adresse (des Deskriptors) zu einem Objekt
- für SASOS attraktiv ist die **kennwortgeschützte Befähigung** [1]
 - sie ist frei kopier-, speicher- und kommunizierbar, wie andere Daten auch
 - für ihre Verwendung muss das Betriebssystem nicht einbezogen werden
- eine solche „spärliche“ Befähigung C versteht sich als Tupel (A, P)
 - mit dem Namen des Objektes bzw. dessen Adresse $A = [0, 2^{64} - 1]$
 - sowie dem Kennwort P , eine wenigstens 64-Bit große Zufallszahl
 - die ein **unberechenbarer physikalischer Prozess** [23] generiert
 - z.B. thermisches Rauschen [1], durch einen A/D-Wandler dargestellt



Einadressraumsystem

Einleitung

Rückblick

Modell

Adressierung

Schutz

Gedankenspiel

Diskurs

Zusammenfassung



- für isolierte Anwendungen ist SAS ein Implementierungsdetail⁴
 - keinen Kontakt/Austausch mit Prozessen anderer Anwendungsprogramme
 - keinen bewussten Kontakt/Austausch mit dem Betriebssystem

↪ eigentlich gibt es nichts, was mit MAS nicht ebenso ginge

↪ andersherum wäre SAS diesen Anwendungen auch kein Hindernis
- für **kooperative Anwendungen** kann SAS von Vorteil sein
 - effiziente/direkte Kommunikation durch simplen Zeigeraustausch
 - *data shipping*
 - *function shipping*
 - sowohl in horizontaler als auch vertikaler Hinsicht
 - innerhalb der Anwendungsprogrammebene zwischen Prozessexemplaren
 - ebenenübergreifend zwischen Anwendungsprogramm- und Betriebssystemebene
- aus Betriebssystemansicht ermöglicht SAS „leichtgewichtiger“ Dienste
 - die mit besseren nichtfunktionalen Eigenschaften behaftet sind

⁴Soweit es die funktionalen Eigenschaften betrifft.



- Anwendungen in eine **speichersichere Zwischensprache** kompilieren
 - in einen geeigneten Bytecode (Zwischenkode) für eine virtuelle Maschine
 - bedarfssynchrone (*just in time*, JIT) Übersetzung dann im Betriebssystem
 - das die übersetzten Programmbestandteile in einem Zwischenspeicher hält
 - das Betriebssystem als Ganzes würde durch diesen Vorgang „urgeladen“
 - bis auf spezielle Module, die in Assembler von Hand zu schreiben sind⁵
 - alle Programme könnten derselben Schutzdomäne zugeteilt sein
 - inkl. Betriebssystemprogramme wäre das der **privilegierte Arbeitsmodus**
 - also der Modus, in dem die CPU initial — beim Anschalten — läuft
 - dann müsste aber auch das Betriebssystem typsicher programmiert sein
 - ansonsten gehen „Systemaufrufe“ an typunsichere externe Unterprogramme
 - diese könnten beliebige Unterprogramme sein, nicht nur Systemprogramme
 - die semantische äquivalente **virtuelle Maschine** wäre zwingend
 - direktes Absetzen privilegierter Maschinenbefehle muss unmöglich sein
 - direktes Durchgreifen auf die (reale) Befehlssatzebene ist verboten
- ↪ obligatorisch für alle Anwendungsprogramme

⁵Wenn es an einer Systemimplementierungssprache mangelt (vgl. [22]).

- verschiedene „virtuelle Maschinen“ mit verschiedenen Fähigkeiten
 - Prozesse der **Anwendungsprogrammebene** sind nicht privilegiert
 - Prozesse der **Betriebssystemebene** sind privilegiert

Zweiklassengesellschaft

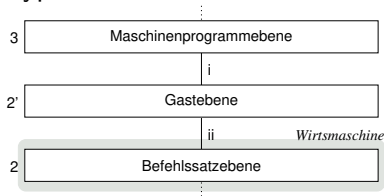
Mit den Anwendungsprogrammprozessen als die „Mittellosen“ und den Betriebssystemprozessen als die „Wohlhabenden“.

↪ gewöhnliche (klassische) zweistufige Qualifizierung der Prozesse genügt

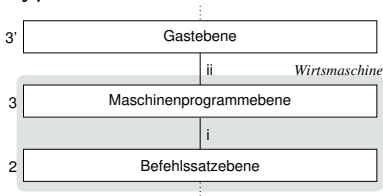
- zum Absetzen privilegierter Befehle muss ein Prozess befähigt sein
 - dies definiert die Schutzdomäne, aus der heraus er den Befehl absetzt
 - unprivilegiert** – die CPU „trapped“ den Prozess, das OS prüft seine Rechte
 - ↪ Prozesse müssen Rechte in Vertrauen (des OS) erhalten
 - privilegiert** – die CPU lässt den Prozess gewähren
 - **Teilinterpretation** [14] privilegierter Befehle unprivilegierter Prozesse
 - durch einen speziellen **Hypervisor**, Monitor für virtuelle Maschinen
 - durch einen Exokern [9], falls mehr als nur diese Befehle zu beachten sind



■ Typ I VMM



■ Typ II VMM



- läuft auf einer „nackten“ Wirtsmaschine
- unter keinem Betriebssystem

- läuft auf einer erweiterten Wirtsmaschine
- unter dem Wirtsbetriebssystem

■ beiden gemeinsames Operationsprinzip ist die **Teilinterpretation**:

- i* durch das Betriebssystem (Typ I) bzw. Wirtsbetriebssystem (Typ II)
- ii* durch den VMM

■ Gegenstand der Teilinterpretation sind **sensitive Befehle**

- jeder Befehl, dessen direkte Ausführung durch die VM nicht tolerierbar ist
 - privilegierte Befehle ausgeführt im unprivilegierten Modus \rightsquigarrow *Trap*
 - bei Virtualisierung auch unprivilegierte Befehle mit kritischen Seiteneffekten



- typische Anforderungen an die Befehlssatzebene [11, S. 47–53]:
 1. annähernd äquivalente Ausführung der meisten unprivilegierten Befehle im System- und Anwendungsmodus des Rechnersystems
 2. Schutz von Programmen, die im Systemmodus ausgeführt werden
 3. Abfangvorrichtung („Falle“, *trap*) für **sensitive Befehle**:
 - a Änderung/Abfrage des Systemzustands (z.B. Arbeitsmodus des Rechners)
 - b Änderung/Abfrage des Zustands reservierter Register oder Speicherstellen
 - c Referenzierung des (für 2. erforderlichen) Schutzsystems
 - d Ein-/Ausgabe
- relevant für SAS sind Mechanismen der CPU für 2. und 3.
 - bei 3.a und 3.b jedoch nur Schutz gegen Änderungsversuche
 - nur die **partielle Virtualisierung** der CPU ist erforderlich⁶
 - herkömmliche Differenzierung des Arbeitsmodus' in *user/system mode*
 - *cli/sti, in/out, ... , mov* mit Operand *%cr3* sind im *user mode* tabu
 - beim *trap* wird ein berechtigter Prozess in den *system mode* befördert und wechselt damit gegebenenfalls seine Schutzdomäne
 - als Systemaufruf verpackt impliziert die Rückkehr in die alte Schutzdomäne

⁶So sind unprivilegierte sensitive Befehle (s. [19] für Pentium) unkritisch.



- Erzeugung eines Prozessexemplars, indem der elterliche Adressraum dupliziert wird, ist kontraproduktiv zu SAS
 - fork(2) impliziert die **Mehrdeutigkeit** von Adressen
 - auch dann, wenn die dahinter stehenden Informationen nicht kopiert werden
 - egal, ob diesem Systemaufruf im Programm direkt ein exec(2) folgt
 - eine solche Annahme darf das Betriebssystem nicht treffen, um zu optimieren
 - denn dann würde es das Anwendungsprogramm „benutzen“ [21]
- um Anwendungsprogramme für ein **Altsystem** (*legacy system/code*) zu unterstützen, sind **Behelfslösungen** adäquat
 - das Textsegment wäre kein Problem, kann gemeinsam genutzt werden
 - ansonsten positionsunabhängiger Kode \rightsquigarrow Quelltext
 - problematisch sind Daten- und Stapelsegment \rightsquigarrow Quelltext
 - positionsunabhängige Zugriffe, relativ über ein Basisregister
 - statische Programmanalyse, um Zeiger zu lokalisieren — im Zusammenspiel mit einem Laufzeitsystem, um Zeiger zu relocieren (à la *garbage collection*)
- SAS ist **disruptiv**, soweit es Standardschnittstellen betrifft, die den Stand der Technik bei Betriebssystemen (POSIX) definieren



Einadressraumsystem

Einleitung

Rückblick

Modell

Adressierung

Schutz

Gedankenspiel

Diskurs

Zusammenfassung



- Einadressraumsysteme
 - sehen die Belange „Adressierung“ und „Schutz“ getrennt voneinander
 - profitieren von Prozessoren mit extrabreiten Adressen $A = [0, 2^{64} - 1]$
 - gebrauchen spärliche, kennwortgeschützte Befähigungen $C = (A, P)$
 - „benutzen“ ansonsten herkömmliche Adressraumverwaltungshardware

*In essence, protection in a SASOS is provided not by controlling what is **in** the address space, but by controlling which parts of it can be **accessed**. [13, S. 7]*

- **Abwärtskompatibilität** zu bewahren, ist eine große Herausforderung
 - SAS ist **disruptiv**, soweit es Standardschnittstellen betrifft, die den Stand der Technik bei Betriebssystemen (POSIX) definieren
- die RISC-V Spezifikation sieht bereits eine 128-Bit Version vor. . .



- [1] ANDERSON, M. ; POSE, R. D. ; WALLACE, C. S.:
A Password-Capability System.
In: *The Computer Journal* 29 (1986), Nr. 1, S. 1–8
- [2] CHASE, J. ; LEVY, H. ; BAKER-HARVEY, M. ; LAZOWSKA, E. :
Opal: a single address space system for 64-bit architecture address space.
In: *Proceedings Third Workshop on Workstation Operating Systems (WWOS 1992)*, 1992, S. 80–85
- [3] CHASE, J. S. ; LEVY, H. M. ; FREELEY, M. J. ; LAZOWSKA, E. D.:
Sharing and Protection in a Single-Address-Space Operating System.
In: *ACM Transactions on Computer Systems* 12 (1994), Nov., Nr. 4, S. 271–307
- [4] CORBATÓ, F. J. ; DAGGETT, M. M. ; DALEY, R. C.:
An Experimental Time-Sharing System.
In: *Proceedings of the 1962 Spring Joint Computer Conference (AFIPS '62)*
American Federation of Information Processing Societies, AFIPS Press, 1962, S. 335–344
- [5] CUCINOTTA, T. ; CHECCONI, F. ; ABENI, L. ; PALOPOLI, L. :
Self-Tuning Schedulers for Legacy Real-Time Applications.
In: *Proceedings of the 5th European Conference on Computer Systems (EuroSys '10)*, Association for Computing Machinery, 2010, S. 55–68



- [6] DALEY, R. C. ; DENNIS, J. B.:
Virtual Memory, Processes, and Sharing in MULTICS.
In: *Communications of the ACM* 11 (1968), Mai, Nr. 5, S. 306–312
- [7] DENNIS, J. B. ; HORN, E. C. V.:
Programming Semantics for Multiprogrammed Computations.
In: *Communications of the ACM* 9 (1966), März, Nr. 3, S. 143–155
- [8] DIJKSTRA, E. W.:
On the Role of Scientific Thought.
<http://www.cs.utexas.edu/users/EWD/ewd04xx/EWD447.PDF>, Aug. 1974
- [9] ENGLER, D. R. ; KAASHOEK, M. F. ; O'TOOLE, J. :
Exokernel: An Operating System Architecture for Application-Level Resource Management.
In: JONES, M. B. (Hrsg.): *Proceedings of the 15th ACM Symposium on Operating System Principles (SOSP '95)*, ACM Press, 1995. – ISBN 0-89791-715-4, S. 251–266
- [10] GISBERT, H. M. ; RIPOLI, I. :
On the Effectiveness of Full-ASLR on 64-bit Linux.
In: *In-depth Security Conference 2014 Europe (DeepSec 2014)* DeepSec GmbH, 2014, S. 1–9



- [11] GOLDBERG, R. P.:
Architectural Principles for Virtual Computer Systems / Harvard University,
Electronic Systems Division.
Cambridge, MA, USA, Febr. 1973 (ESD-TR-73-105). –
PhD Thesis
- [12] GRAHAM, G. S. ; DENNING, P. J.:
Protection—Principles and Practice.
In: *Proceedings of the Spring Joint Computer Conference (AFIPS '72)*.
New York, NY, USA : ACM, 1972, S. 417–429
- [13] HEISER, G. ; ELPHINSTONE, K. ; VOCHTELOO, J. ; RUSSEL, S. ; LIEDTKE, J. :
The Mungi Single-Address-Space Operating System.
In: *Software—Practice and Experience* 18 (1998), Jul., Nr. 9
- [14] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Betriebssystemmaschine.
In: LEHRSTUHL INFORMATIK 4 (Hrsg.): *Systemprogrammierung*.
FAU Erlangen-Nürnberg, 2015 (Vorlesungsfolien), Kapitel 5.3
- [15] LIEDTKE, J. :
On the Realization of Huge Sparsely-Occupied and Fine-Grained Address Spaces,
TU Berlin, Diss., 1996



- [16] NELSON, B. J.:
Remote Procedure Call.
Pittsburg, PA, USA, Department of Computer Science, Carnegie-Mellon University,
Diss., Mai 1981
- [17] NELSON, R. A.:
Mapping Devices and the M44 Data Processing System / IBM Research Division.
IBM Watson Research Center, Yorktown Heights, New York, Okt. 1964 (RC1303). –

Research Report
- [18] ORGANICK, E. I.:
The Multics System: An Examination of its Structure.
MIT Press, 1972. –
ISBN 0-262-15012-3
- [19] ROBIN, J. S. ; IRVINE, C. E.:
Analysis of the Intel Pentium's Ability to Support a Secure Virtual Machine
Monitor.
In: *Proceedings of 9th USENIX Security Symposium (SSYM'00)*, USENIX
Association, 2000, S. 1-16



- [20] SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. ; LEHRSTUHL INFORMATIK 4 (Hrsg.):
Betriebssystemtechnik — Adressräume: Trennung, Zugriff, Schutz.
FAU Erlangen-Nürnberg, 2013 (Vorlesungsfolien)
- [21] SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Hierarchien.
In: [20], Kapitel 4
- [22] SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Sprachbasierte Systeme.
In: [20], Kapitel 7
- [23] WALLACE, C. S.:
Physically Random Generator.
In: *Computer Systems Science and Engineering* 5 (1990), Apr., Nr. 2, S. 82–88
- [24] YARVIN, C. ; BUKOWSKI, R. ; ANDERSON, T. :
Anonymous RPC: Low-Latency Protection in a 64-Bit Address Space.
In: *USENIX Summer 1993 Technical Conference (USENIX Summer 1993 Technical Conference)* Bd. 1.
Cincinnati, OH : USENIX Association, Jun. 1993, S. 13:1–12

