

Systemprogrammierung

Grundlagen von Betriebssystemen

Teil B – VI.3 Betriebssystemkonzepte: Adressbindung

Wolfgang Schröder-Preikschat

17. Juni 2021



Gliederung

Einführung
Semiotik
Informatik

Namensauflösung
Speicheradressen
Pfadnamen

Symbolauflösung
Übersetzer
Binder
Lader

Zusammenfassung



Agenda

Einführung
Semiotik
Informatik

Namensauflösung
Speicheradressen
Pfadnamen

Symbolauflösung
Übersetzer
Binder
Lader

Zusammenfassung



Lehrstoff

Namensauflösung: Symbol \mapsto Adresse

- ein **Vorgang**, der die Adresse eines Adressraums \mathbb{X} an die Adresse eines Adressraums \mathbb{Y} bindet
 - die Adresse in \mathbb{X} ist eine reale, physische Adresse
 - die Adresse in \mathbb{Y} ist eine logische, virtuelle oder symbolische Adresse
 - ↪ eine Abbildung von einem Adressraum auf einen anderen Adressraum
- die **Bindung** geschieht zu verschiedenen Zeitpunkten, jedoch immer ist das Ziel, **absolute Adressen** zu generieren
 - Übersetzungszeit** ■ der Programmquelltext enthält symbolische Adressen
 - übersetzt mit **Kompilierer** Ebene₅
 - ↪ *compile time binding*
 - Ladezeit** ■ Programme enthalten relative/verschiebbare Adressen
 - verlagert mit **Lader** Ebene₃
 - ↪ *load time binding*
 - Ausführungszeit** ■ Programme enthalten relative/verschiebbare Adressen
 - verlagert mit **Adressumsetzungseinheit**¹ Ebene₂
 - ↪ *execution time binding, run-time binding*



¹Allgemein ein Interpreter, speziell das Betriebssystem und die MMU.

Definition (www.duden.de)

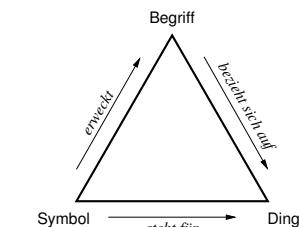
Kennzeichnende Benennung eines Einzelwesens, Ortes oder Dinges, durch die es von anderen seiner Art unterschieden wird; Eigenname.

- die Bezeichnung von einer **Entität** innerhalb eines Rechensystems, die „nach außen“ zugänglich sein müssen
 - allgemein Stellen im Haupt-, Arbeitsspeicher und in der Ablage
 - zu referenzierende Bezugspunkte von Programmtext und -daten
- dabei hat diese Bezeichnung nur innerhalb von einem bestimmten **Kontext** eine wohldefinierte und eindeutige Bedeutung
 - innerhalb eines (realen, logischen, virtuellen) Adressraum, Dateisystems
- in dem Zusammenhang werden grundlegende **Abbildungsfunktionen** behandelt, die Bezeichnungen in **Adressen** umwandeln
 - Seitenadressierung, Segmentierung und Kombinationen davon
 - Indexierung bei Dateisystemen: Indexknotentabelle, Verzeichnis, Dateien
 - Symbolverwaltung von Kompilierer, Assemblierer, Binder und Lader

Semiotisches Dreieck

Beziehung zwischen Benennung (*Bezeichnung*), Begriff (*Bedeutung*) und Gegenstand (*Bezeichnetes*).

- Benennung meint die Versprachlichung einer Vorstellung
 - ruft Begriffe ins Bewusstsein
 - bezeichnet einen Gegenstand, ein Ding
- Bezeichnung umfasst insbesondere auch nichtsprachliches wie:
 - **Symbole** und **Nummern**
- Bezeichnetes ist ein Objekt — nicht nur im informatischen Sinne
 - mit einem **Namen** versehen, benannt durch ein oder mehrere Wörter
- die Benennung ist sprachlich richtig und treffend auszulegen
 - möglichst genau und dabei knapp zugleich
 - am Sprachgebrauch orientieren
 - auf **Fachsprache** bezogen, nicht Flexibilität brauchende Gemeinsprache



Bezeichnung

Fachsprache: Systemprogrammierung

- **Dienstprogramm (utility)** zum Nachschlagen einer Internetadresse

```

1 #include <sys/socket.h>
2 #include <netinet/in.h>
3 #include <arpa/inet.h>
4
5 #include <netdb.h>
6 #include <stdlib.h>
7 #include <stdio.h>
8
9 int main(int argc, char **argv) { /* greatly simplified variant of host(1) */
10     if (argc == 2) {
11         struct hostent *host = gethostbyname(argv[1]);
12         if (host != NULL) {
13             unsigned int i = 0;
14             printf("%s = ", host->h_name);
15             while (host->h_addr_list[i] != NULL)
16                 printf("%s ", inet_ntoa(*((struct in_addr*)(host->h_addr_list[i]))));
17             printf("\n");
18         }
19     }
20 }
```

- darin werden verschiedene Dinge symbolisch bezeichnet
 - das Programm main samt Variablen argc, argv, host und i
 - sowie die Unterprogramme gethostbyname, printf und inet_ntoa
- hinzu kommen Bezeichnungen, die in der Hand der Umgebung liegen
 - der Dateiname host.c und Pfadname ./a.out bzw. ./host
 - sowie eine Internetadresse als Programmparameter argv[1]

Auflösung von Namen

... in Ziffern

- durch Kompilierer, Assemblierer und Binder (Ebene₅ \mapsto Ebene₃)
 - symbolische (Text, Daten) auf numerische Referenz
- durch Betriebssystem (Ebene₃ \mapsto Ebene₂)
 - numerische Referenz auf virtuelle, logische oder reale Adresse
 - insbesondere auch Prozesskennung (PID) auf Prozesskontrollblock
 - aber ebenso Dateizeiger (FILE*) auf Dateideskriptor
 - allgemein/abstrakt: eine Handhabe (*handle*) auf eine Systemressource
 - symbolische auf numerische Referenz²
 - Pfadname (Verzeichnis, Datei) auf Indexknotennummer (*inode number*)
 - Internetadresse (URL) auf Netzwerkadresse (IP-Adresse)

Gemeinsamkeit: *Symbol \mapsto Nummer*

Dies trifft auch zu auf die Herleitung einer virtuellen, logischen oder realen Adresse aus einer numerischen Referenz. Denn letztere ist als Zwischenschritt zu begreifen, der Dinge eines symbolisch formulierten Programms eine numerische Identität gibt. Daher ist die Abbildung Ebene₅ \mapsto Ebene₂ ganzheitlich zu sehen:
 \hookrightarrow symbolische Referenz auf virtuelle, logische oder reale Adresse.

²Die ggf. auf eine Speicheradresse abgebildet wird, wie eben geschildert.

Gliederung

Einführung
Semiotik
Informatik

Namensauflösung
Speicheradressen
Pfadnamen

Symbolauflösung
Übersetzer
Binder
Lader

Zusammenfassung



Ortstransparente Namen

- Adressen, die **Speicherorte** bezeichnen, können realer, logischer oder virtueller Natur sein
 - **real** ■ muss exakt dort liegen, intern
 - **logisch** ■ kann woanders liegen, intern
 - **virtuell** ■ kann woanders liegen, intern oder extern
- als **interner Ort** ist ein Platz im Hauptspeicher gemeint, identifiziert durch eine Adresse im realen Adressraum
 - insbesondere die „anwesende Seite“ im Falle von Speichervirtualisierung
- demgegenüber drückt **externer Ort** aus, dass der Platz irgendwo im System aber eben nicht im Hauptspeicher liegt
 - in der Ablage oder im Hauptspeicher eines anderen Rechensystems
 - beide gegebenenfalls nur indirekt über ein Rechnernetz zugänglich
- dies schließt **speicherabgebildete (memory-mapped) Dinge** mit ein, also im logischen/virtuellen Adressraum platzierte Objekte
 - wie etwa Gerätereister, Bildspeicher oder **Dateien**
 - der Zugriff läuft dann über Lese-/Schreibaktionen der Befehlssatzebene

Den Ziffern allein ist
der wirkliche Ort
nicht anzusehen.



Adresse als Synonym

Name oder Ort

Definition ([1, S. 157–158])

- An address used by the programmer is called a “name” or a “virtual address,” and the set of such names is called the address space, or name space.
 - An address used by the memory is called a “location” or “memory address,” and the set of such locations is called the memory space.
 - Since the address space is regarded as a collection of **potentially** usable names for information items, there is no requirement that every virtual address “represent” or “contain” any information.
-
- die Deutung ist **kontextabhängig**, ebenso was die Adresse bezeichnet
 - derselbe Name in verschiedenen Namensräumen kann verschiedene Orte (nicht nur in einem Rechensystem) adressieren
 - derselbe Ort kann über verschiedene Namen adressiert werden



Organisation des Namensraums

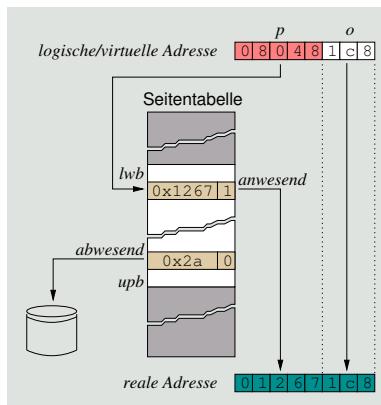
- **Seitenadressierung (paging)** mittels **Seitentabelle** [5, S. 29–30]
 - jede von der CPU generierte Adresse wird gedeutet als $A_p = (p, o)$, wobei
Versatz $o = [0, 2^w - 1]$, mit $9 \leq w \leq 30$ (**offset**)
Seitenummer $p = [0, 2^{n-w} - 1]$, mit $32 \leq n \leq 64$, Tabellenindex
 - eine gewöhnliche **lineare Adresse** \sim **eindimensionaler Adressraum**
 - d.h., Oktette oder Worte in einer Dimension aufgereiht
- **Segmentierung (segmentation)** mittels **Segmenttabelle**
 - jede Adresse ist repräsentiert als Zweitupel $A_s = (s, d)$, wobei
Segmentname $s = [0, 2^m - 1]$, mit $12 \leq m \leq 18$, Tabellenindex
Verschiebung $d = [0, 2^n - 1]$, mit $32 \leq n \leq 64$ (**displacement**)
 - Zweikomponentenadresse \sim **zweidimensionaler Adressraum**
 - d.h., Segmente in der ersten und Segmentinhalte in der zweiten Dimension
- Kombination:
 - **segmentierte Seitenadressierung (segmented paging)**
 - die Seitentabellen sind segmentiert, d.h., $A_p = (p, o)$ mit $p = (s, d)$
 - **seitenummerierte Segmentierung (paged segmentation)**
 - die Segmente sind seitenummeriert, d.h., $A_s = (s, d)$ mit $d = (p, o)$ oder
die Segmenteinheit generiert eine lineare Adresse A_p für die Seiteneinheit



Seitenadressierung

paging

- auf Basis einer ein-/mehrstufigen **Seitentabelle** als **statisches Feld**:



- ein **Seitenfehler (page fault)** bedeutet damit verschiedenerlei:
 - gültig falls $P_{lwb} \leq p \leq P_{upb}$, dann ist p abwesend oder ungenutzt
 - eine ungenutzte Seite ist gültig, sie wurde nur noch nicht abgebildet
 - sonst ungültig: die betreffende Seite gehört nicht zum Prozessadressraum

©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

2.1 Namensauflösung – Speicheradressen

VI.3/13

Adresse als Standort

... einer bestimmten Bestandsart

- gemeint sind Standortnamen von **Dateien** in der **Ablage**, aber auch zur Bezeichnung lokaler **Betriebsmittel** oder Systemstrukturen
 - ursprünglicher Bezugspunkt ist die Datei (*file*), d.h., eine abgeschlossene Einheit zusammenhängender Daten
 - dieses **speicherzentrische Betriebsmittel** ist aber nur das Beispiel einer einzelnen Bestandsart, andere sind etwa:
 - Kommunikationsmittel – Kanal (*pipe*), Sockel (*socket*), Briefkasten
 - Gerät – zeichen-, block-, stromorientiert
 - Zustandsdaten – Prozesstabellen, Adressraumbelegung, ...
- allgemein sind so einige anwendungsrelevante und durch Betriebssysteme bereitgestellte (Exemplare von) **Typen** namentlich zugänglich
- wichtiger Aspekt in dem Zusammenhang ist das **Verzeichnis** solcher Namen und die zugrunde gelegte Organisationsform
 - Struktur eines Namensraums in lokaler und globaler Hinsicht
 - Art der Verknüpfung zwischen Namen und dem benannten Ding
- ist **Persistenz** von Namen, Verzeichnissen und Abbildungen verlangt, bietet ein **Dateisystem** eine adäquate Implementierungsgrundlage

©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

2.2 Namensauflösung – Pfadnamen

VI.3/14

Benennung

... von Exemplaren bestimmter Betriebsmitteltypen

<https://de.wikipedia.org/wiki/Benennung>

Bezeichnung eines Gegenstands durch ein Wort oder mehrere Wörter.

- gedeutet in Bezug auf grundlegende Betriebssystemkonzepte, die mit Multics [8] eingeführt wurden:
 - ein Wort** ■ der **Name** relativ zu einem bestimmten **Kontext**
 - lokal (in seinem Kontext) eindeutig, global mehrdeutig
 - mehrere Wörter** ■ der **Pfadname** im Namensraum zum benannten Ding
 - global eindeutige Bezeichnung des Namenskontextes
- die **Mehrwortbenennung** sieht einen „Trenntext“ als **Separator** vor, den die Namensverwaltung im Betriebssystem definiert, z.B.:
 - > ■ Multics (*greater-than*)
 - / ■ UNIX (*slash*)
 - \ ■ Windows (*backslash*)
- wohingegen jedoch die Namen selbst für die Namensverwaltung ohne Bedeutung sind und i.A. von ihr nicht interpretiert werden³

³ „Name ist Schall und Rauch.“ (Goethe: Faust I, Vers 3456 f.)

©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

2.2 Namensauflösung – Pfadnamen

VI.3/15

Alphabet und Wortlänge

Vielfalt von Zeichenkodes

Jedes Programm (inkl. das Betriebssystem) kann eigenen Ressourcen Zeichenketten zuordnen und Prozessen diese bekanntgeben.

- den **Zeichenvorrat** für Namen und Komponenten eines Pfadnamens gibt die Namensverwaltung des Betriebssystems vor
 - allgemein die Menge der druckbaren Zeichen (ASCII) ohne Trennzeichen⁴
 - je nach Betriebssystem gibt es weitere Ausnahmen (Windows = {", *, /, ?, |})
- genau genommen werden Bezeichnungen aber aus **Ordnungszahlen** gebildet, die ein **Zeichensatz** erst in Zeichen umwandelt
 - z.B. UTF-8 (Linux), latin-1 (macOS) oder CP 437 (DOS)
 - nicht jede Ordnungszahl entspricht somit zwingend demselben Zeichen !
- ähnlich uneinheitlich ist die erlaubte Länge einer **Zeichenkette**, um Namen oder Pfadnamen zu formulieren
 - 1–255 Zeichen pro Name, bei UNIX auch pro Pfadnamenskomponente
 - bis zu 2¹⁵ – 1 Zeichen pro Pfadname in Windows

⁴Nach ISO 9660: ausschließlich Großbuchstaben, Ziffern und Unterstrich.

©wosch

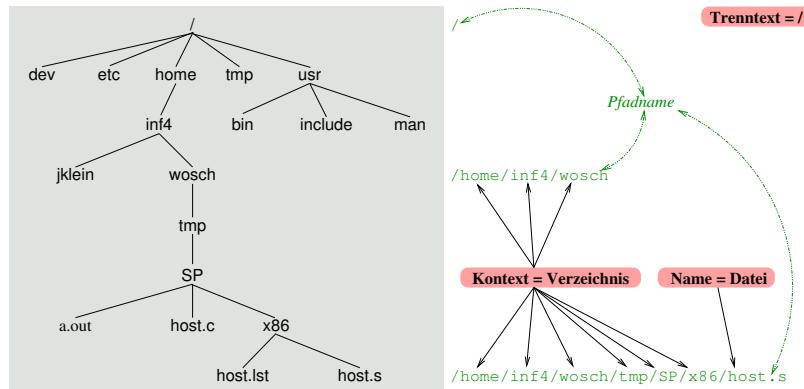
SP (SS 2021, B – VI.3)

2.2 Namensauflösung – Pfadnamen

VI.3/16

Hierarchischer Namensraum I

Datebaum (*file tree*)



- ein **Kontext** repräsentiert einen Namensraum flacher Struktur
 - darin muss Eindeutigkeit mit der Namenswahl selbst gewährleistet sein
- im Gegensatz zu einem Namensraum hierarchischer Struktur (s. o.)
 - derselbe Name (`tmp`) kann in verschiedenen Kontexten definiert sein
 - durch den Pfadnamen wird sein jeweiliger Standort eindeutig gemacht

©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

2.2 Namensauflösung – Pfadnamen

VI.3/17

Hierarchischer Namensraum II

Dateiverzeichnis (*file directory*)

- fundamental für die Hierarchiebildung ist das **Verzeichnis** (*directory*)
 - es ordnet einen/mehrere Namen, auch Verzeichnisnamen, listenförmig an
 - ist namentlich selbst in einem **Elterverzeichnis** (*parent directory*) gelistet
 - es gibt mehreren Namen ein gemeinsames Merkmal, denselben Kontext
 - bspw. Standort/Bezugspunkt innerhalb des Namensraums, Zugriffsrechte
 - es dient der Umsetzung von symbolischen in numerischen Adressen

Verzeichniseintrag (*directory entry*)

Speichert die Abbildung eines Namens auf eine Informationsstruktur.

- UNIX-artige Betriebssysteme bieten zudem vordefinierte Kontexte:
 - Wurzelverzeichnis** (*root directory*) des Systems⁵
 - Einstiegspunkt in, aber auch „Steckverbinder“ für, den Namensraum
 - Heimatverzeichnis** (*home directory*) eines autorisierten Benutzers
 - initiales Arbeitsverzeichnisses nach erfolgter Anmeldung (*login*)
 - Arbeitsverzeichnis** (*working directory*) eines zugelassenen Prozesses
 - gegenwärtiger, relativer Standort des Prozesses im Namensraum

⁵Womit der Namensraum in einen bestehenden anderen Namensraum an einem Befestigungspunkt (*mount point*) gegebenenfalls eingebunden werden kann.

Informationsstruktur

Indexknoten (*index node, inode*)

- aggregiert wesentliche **Attribute** eines benannten Gegenstands:
 - Eigentümer (*user ID*)
 - Gruppenzugehörigkeit (*group ID*)
 - Rechte (lesen, schreiben, ausführen: für Eigentümer, Gruppe und Welt)
 - Zeitstempel (letzter Zugriff, letzte Änderung (Typ, Zugriffsrechte))
 - Anzahl der Verweise („hard link“-Zähler)
 - Typ:
 - Verzeichnis
 - symbolische Verknüpfung (*symbolic link*)
 - Kommunikationskanal (*pipe, named pipe*)
 - Sockel (*socket*) zur Interprozesskommunikation
 - Gerätedatei ~ zeichen-/blockorientiertes Gerät, Pseudogerät, Treiberklasse
 - reguläre Datei ~ Größe in Bytes und Blocknummer(n) in der Ablage
- besitzt in einem Namensraum eine eindeutige **numerische Adresse**

Indexknotennummer (*inode number*)

Hat mit einer logischen Adresse gemeinsam, dass sie nur innerhalb ihres „Adressraums“ (d.h. Namensraums) eindeutig ist.

©wosch

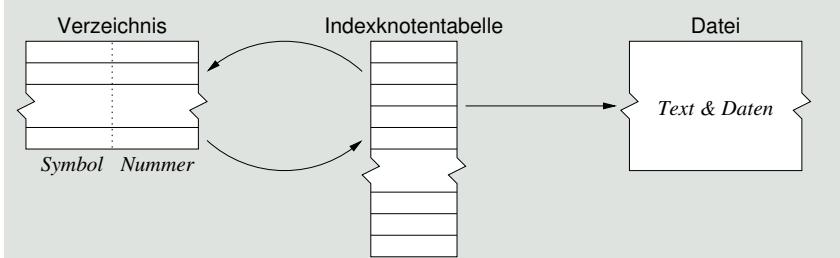
SP (SS 2021, B – VI.3)

2.2 Namensauflösung – Pfadnamen

VI.3/19

Datenstrukturen im Namensraum

Dateisystem (*file system*)



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

©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

2.2 Namensauflösung – Pfadnamen

VI.3/20

Verzeichniseintrag I

Dateisystem (*file system*)

- die **feste Verknüpfung** (*hard link*) von einem Dateinamen mit einer Indexknotennummer (UNIX V7, *dir.h*):

```
1 typedef unsigned short ino_t;           ■ eine als Wertepaar gespeicherte
2 #define DIRSIZ 14                      ■ surjektive Abbildung
3
4 struct direct {                         ■ mehrere Paare können zum selben
5     ino_t d_ino;                        ■ Indexknoten (d_ino) zeigen
6     char d_name[DIRSIZ];                ■ im selben Verzeichnis jedoch mit
7 };
```

- in einem Indexknoten ist die Anzahl der auf ihn verweisenden Wertepaare desselben Namensraums gespeichert (*reference counter*)
- alle Indexknoten eines Namensraums sind in einer **Indexknotentabelle** (*inode table*) im Namensraum daselbst gespeichert
 - d_ino* ist der **Indexwert** eines Verzeichniseintrags für diese Tabelle
- Anlegen/Löschen erfordert **Schreibzugriffsrecht** auf das Verzeichnis
- unabhängig von den Zugriffsrechten auf die referenzierte Datei



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

2.2 Namensauflösung – Pfadnamen

VI.3/21

Bindung und Auflösung

Abbildung $f : N_{\text{symbolisch}} \mapsto N_{\text{numerisch}}$

- Namensbindung** (*name binding*) kommt zuerst, also die **Abbildung** der symbolischen Adresse in eine numerische Adresse
 - einen Pfadnamen mit einem Indexknoten assoziieren: *creat(2)*, *link(2)*
 - geschieht zum **Erzeugungszeitpunkt** eines Datei-/Verzeichnisnamens
 - diesen mit einem freien/belegten Indexknoten verknüpfen und
 - dann in ein Namensverzeichnis eintragen
- Namensauflösung** (*name resolution*) kommt später, die **Umsetzung** der symbolischen Adresse in eine numerische Adresse
 - einen Indexknoten anhand eines Pfadnamens lokalisieren: *open(2)*
 - geschieht zum **Benutzungszeitpunkt** eines Datei-/Verzeichnisnamens
 - Verzeichnisse für jeden einzelnen Namen im Pfad durchsuchen und
 - schließlich den Dateinamen (Blatt) auffinden

Hinweis

Der Indexknoten besitzt eine Adresse (a) in der Ablage und (b) im Arbeitsspeicher. Diese ist eine Art **virtuelle Adresse**, über die Inhalte von Dateien speicherabgebildet im virtuellen Adressraum indirekt zugänglich werden. Die Ladestrategie operiert vorausschauend.



©wosch

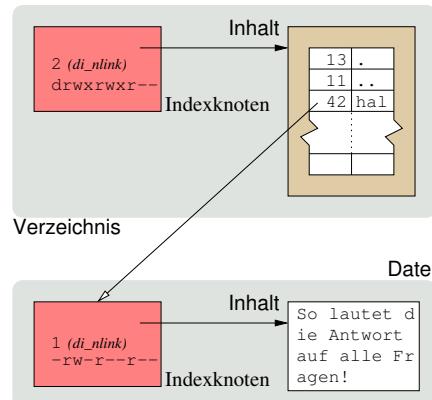
SP (SS 2021, B – VI.3)

2.2 Namensauflösung – Pfadnamen

VI.3/23

Verzeichniseintrag II

- ein Namensverzeichnis ist eine **spezielle Datei** der Namensverwaltung



- das selbst einen Namen hat, der einen Indexknoten bezeichnet
- über eine Verknüpfung erreichbar ist aus einem anderen Verzeichnis
- Namen getrennt von eventuellen Dateiinhalten speichert

Verknüpfungen anlegen/löschen zu können, ist eine **Berechtigung**, die sich nur auf das Verzeichnis der betreffenden Verknüpfungen bezieht!

- Selbstreferenz („dot“, 13) und Elterverzeichnis („dot dot“, 11) geben wenigstens zwei Verweise auf ein Verzeichnis
 - auch wenn das Verzeichnis selbst sonst keine weiteren Namen enthält



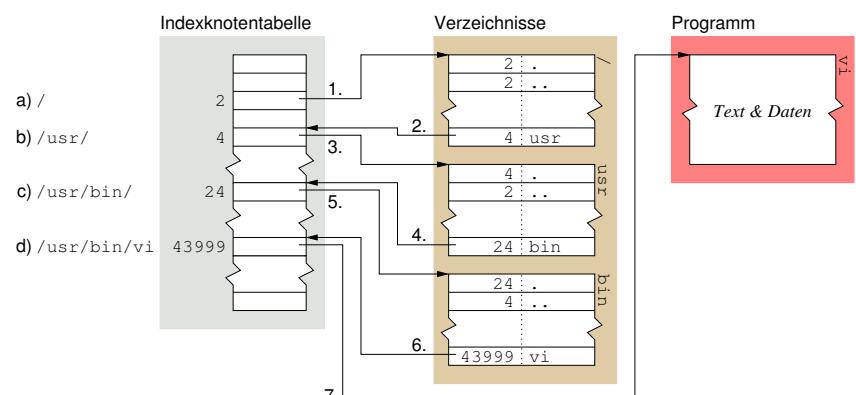
©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

2.2 Namensauflösung – Pfadnamen

VI.3/22

Auflösung am Beispiel von /usr/bin/vi



- Wurzelverzeichnis des Namensraums öffnen
- darin Namenseintrag *usr* suchen, ist ein Verzeichnis, öffnen
- darin Namenseintrag *bin* suchen, ist ein Verzeichnis, öffnen
- darin Namenseintrag *vi* suchen, ist ein Programm, öffnen



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

2.2 Namensauflösung – Pfadnamen

VI.3/24

Symbolische Verknüpfung

symbolic link

- Indexknotennummern gelten nur in einem bestimmten **Namenraum**
 - der Zugriff auf einen anderen Namensraum ist darüber nicht möglich
 - sie teilen sich damit dieselbe Eigenschaft wie logische/virtuelle Adressen
 - sie sind ein **Tabellenindex**, wie der *p*- bzw. *s*-Anteil dieser Adressen
- der hierarchische Namensraum ist ein **gerichteter azyklischer Graph**
 - um den **Wurzelbaum** zu erhalten, scheiden feste Verknüpfungen aus
 - feste Verknüpfungen zu Verzeichnissen zerstören die azyklische Struktur
 - das Elterverzeichnis (...) eines Verzeichnisses wäre dann uneindeutig
 - die Namensraumabsuche (*name space search*) könnte „endlos schleifen“
- Abbildung $f : N_s^d \rightarrow N_s^z$ hat diese Merkmale nicht
 - feste Verknüpfungen sind ununterscheidbar, symbolische nicht: **Dateityp**
 - symbolische Verknüpfungen haben Indexknoten, feste nicht
 - sie gelten daher jeweils auch als:
 - langsam** weil indirekt gespeichert, in den Datenblöcken als reguläre Datei
 - schnell** weil direkt gespeichert, im Indexknoten selbst⁶
- Ursprung ist der **symbolische Name** (*symbolic name*) in Multics [2]
 - zur dynamischen Bindung von Namen an (besondere) E/A-Geräte

⁶Aber nur schnell bei einem Verweis auf einen Eintrag im selben Verzeichnis!

©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

2.2 Namensauflösung – Pfadnamen

VI.3/25

Adresse als Symbol

Abbildung $f : A_{symbolisch} \rightarrow A_{numerisch}$

- am Anfang ist gemeinhin die **symbolische Adresse** in Programmen, die in einem mehrstufigen Verfahren aufzulösen ist

```
1 int main(int argc, char **argv) {
2     if (argc == 2) {
3         struct hostent *host = gethostbyname(argv[1]);
4         if (host != NULL) {
5             unsigned int i = 0;
6             printf("%s ", host->h_name);
7             while (host->h_addr_list[i] != NULL)
8                 printf("%s ", inet_ntoa(*(struct in_addr*)(host->h_addr_list[i++])));
9             printf("\n");
10        }
11    }
12 }
```

- Kompilierer** ■ verteilt Programmtext und -daten auf Programmsegmente
■ generiert dazu Pseudobefehle, die der Assemblierer deutet
- Assemblierer** ■ ordnet Programmsymbolen Werte und Attribute zu
■ generiert Symbol- und Verlagerungstabellen für den Binder
- Binder** ■ platziert das gebundene Programm im Adressraum
■ produziert das Lademodul dazu für das Betriebssystem
- zusätzlich erfolgt die Generierung des Maschinenkodes, zwei Schritte:
 - Kompilierung des Quellcodes in eine andere symbolische Darstellung
 - Assemblierung und Bindung in die benötigte numerische Auslegung



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

3.1 Symbolauflösung – Übersetzer

VI.3/27

Gliederung

Einführung
Semiotik
Informatik

Namensauflösung
Speicheradressen
Pfadnamen

Symbolauflösung
Übersetzer
Binder
Lader

Zusammenfassung



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

3. Symbolauflösung

VI.3/26

Pseudobefehle

- Programmsymbole auf **Binderabschnitte** (*linker sections*) verteilen

```
1 .file "host.c"
2 .section .rodata.str1.i,"aMS",@progbits,1
3 .LCO:
4     .string "%s = "
5 .LC1:
6     .string "%s"
7 .section .text.startup,"ax",@progbits
8 .p2align 4,,15
9 .globl main
10 .type main, @function
11 main:
```

- 2 ■ beleg- und nur lesbare ("aMS") **Datensegment** (2–6)
- Symbole .LCO und .LC1 sind nur lokal definiert
- 7 ■ beleg- und ausführbares ("ax") **Textsegment** (7–83, vgl. S. 29)
- 8 ■ Wert der Adresse des Abschnitts soll Vielfaches von 16 sein
- 9–10 ■ Symbol **main** ist global definiert, eine Funktion
- die Symbole werden bekannt gemacht und mit Attributen verknüpft
 - Text, Daten, Sichtbarkeit, Typ, Benutzungsart
- Adresswerte in Bezug auf den Prozessaddressraum stehen noch aus
 - konkrete Werte für die Symbole und die einzelnen Maschinenbefehle



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

3.1 Symbolauflösung – Übersetzer

VI.3/28

Programmfuß

Pseudobefehle

Abschluss der Übersetzungseinheit (compilation unit)

```

81 .LFE19:
82     .size    main, .-main
83     .ident   "GCC: (Debian 4.7.2-5) 4.7.2"
84     .section .note.GNU-stack,"",@progbits

```

- dem Symbol **main** die Länge des Programmtextes zuweisen
- das Programmteil benötigt kein ausführbares ("") Stapelsegment
- Ergebnis der Assemblierung ist das Binde- oder **Objektmodul**, das u.a. zwei (vom Assemblierer zusammengestellte) Tabellen enthält
 - Symboltabelle** ■ listet alle in dem Modul definierten Symbole und ■ assoziiert jedes Symbol mit Werten und Attributen
 - Verlagerungstabelle** ■ listet alle „undefineden Stellen“ in dem Modul ■ Stellen, wo definierte Adresswerte noch fehlen
- jedes Text- und Datenelement besitzt eine **vorläufige Adresse**, die relativ zur Basisadresse 0 ausgelegt/-gerichtet ist
 - Stellen mit undefineden Adressen korrigiert der **Binder** oder der **Lader**
 - d.h., es erfolgt die **Verlagerung** einer an dieser Stelle liegenden Referenz
 - Korrekturmaß ist die Ladeadresse des gebundenen Programms
 - die **Verlagerungskonstante**, gemäß Adressraummodell des Betriebssystems



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3.)

3.1 Symbolauflösung – Übersetzer

VI.3/29

Maschinenprogramm

symbolischer Maschinenkode

derselbe Ausschnitt wie zuvor, jedoch dem **Lademodul** entnommen

```

1 0x00000000004003e9 <+9>:    mov    0x8(%rsi),%rdi
2 0x00000000004003ed <+13>:   callq  0x415e60 <gethostbyname>
3 0x00000000004003f2 <+18>:   test   %rax,%rax
4 0x00000000004003f5 <+21>:   mov    %rax,%rbp
5 0x00000000004003f8 <+24>:   je     0x400458 <main+120>
6 0x00000000004003fa <+26>:   mov    (%rax),%rsi
7 0x00000000004003fd <+29>:   mov    $0x48d1a4,%edi
8 0x0000000000400402 <+34>:   xor    %eax,%eax
9 0x0000000000400404 <+36>:   xor    %ebx,%ebx
10 0x0000000000400406 <+38>:  callq  0x401120 <printf>

```

- vorher noch **unaufgelöste Referenzen** haben definierte Werte erhalten:
 - 0x415e60 → gethostbyname
 - 0x48d1a4 → .LC0
 - 0x401120 → printf
- allen Text- und Datenelementen wurden **absolute Adressen** zugewiesen
 - der Programmausschnitt liegt im Adressbereich [4003e9₁₆, 400406₁₆]
 - bei Ausführung nimmt der Befehlszähler u.a. Werte aus diesem Bereich an
- die Adresswerte allein sagen nichts zur Art des Adressraums aus
 - es könnte ein realer, logischer oder virtueller Adressraum sein
 - Wissen über das **Adressraummodell** des Betriebssystems gibt Aufschluss



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3.)

3.2 Symbolauflösung – Binder

VI.3/31

Programmrumpf

Assemblierprogrammauflistung

Auflistung (listing) der Übersetzungseinheit nach der Assemblierung

```

1 26 0009 488B7E08    movq  8(%rsi), %rdi
2 27 000d E8000000    call   gethostbyname
3 27 00
4 28 0012 4885C0    testq  %rax, %rax
5 29 0015 4889C5    movq  %rax, %rbp
6 30 0018 745E    je     .L8
7 31 001a 488B30    movq  (%rax), %rsi
8 32 001d BF000000    movl  $.LC0, %edi
9 32 00
10 33 0022 31C0   xorl  %eax, %eax
11 34 0024 31DB   xorl  %ebx, %ebx
12 35 0026 E8000000    call   printf
13 35 00

```

typischerweise vier Bereiche:

1. Zeilennummer des Befehls, hier: 26–35
2. relative Adresse im Programm, hier: 0009–0026 (Hexadezimal)
3. numerischer Maschinenkode, hier: 32 Bit (4 Bytes) pro Zeile
4. Mnemonik und Operand(en)

an folgenden Stellen/relativen Adressen ist Verlagerung erforderlich:

2/000e ■ Adresse für gethostbyname, externe Referenz (libc)

8/001e ■ Adresse für .LC0, interne Referenz (vgl. S. 28)

12/0027 ■ Adresse für printf, externe Referenz (libc)

korrekte Programmausführung benötigt Korrektur an diesen Stellen

■ dort stehende **absolute Adressen** müssen zum Adressraummodell passen

©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3.)

3.1 Symbolauflösung – Übersetzer

VI.3/30

Adressraummodell des Betriebssystems

x86_64 Linux

Adressraumbelegung für dieses „Programm in Ausführung“

```

1  wosch@faui48e 111$ ./a.out faui40.cs.fau.de &
2  [1] 20857
3  faui40.informatik.uni-erlangen.de = 131.188.34.40
4  wosch@faui48e 112$ cat /proc/20857/maps
5  00400000-00401000 r-xp 00000000 00:2a 38020125   /home/inf4/wosch/tmp/a.out
6  00600000-00601000 rw-p 00000000 00:2a 38020125   /home/inf4/wosch/tmp/a.out
7  01ff9000-0201a000 rw-p 00000000 00:00 0           [heap]
8  7ff03d63ad000-7ff03d6f82000 rw-p 00000000 00:00 0   shared libraries
9  7ffc79532000-7ffc79553000 rw-p 00000000 00:00 0   [stack]
10 7ffc795b8000-7ffc795b9000 r-xp 00000000 00:00 0   [vdso]
11 ffffffffff600000-fffffffffff601000 r-xp 00000000 00:00 0   [vsyscall]

```

5 ■ Textsegment, effektiv 4 KiB (eine Seite), insgesamt 2 MiB

6 ■ Datensegment, effektiv 4 KiB (eine Seite), insgesamt ≈ 26 MiB

7 ■ Haldenspeicher, vorgegeben 132 KiB, erweiterbar

9 ■ Stapelspeicher, vorgegeben 132 KiB, erweiterbar

■ die Größenangaben variieren mit dem Programm und dem Prozess !

■ für einen Prozess adressier- aber nicht belegbar sind die Bereiche:

8 ■ Gemeinschaftsbibliotheken (*shared libraries*)

10/11 ■ Systemaufrufbeschleunigung (vgl. auch [4, S. 21–22])

■ **Ladeadresse** — und somit **Verlagerungskonstante** — ist 0x400000

- der Bereich [0, 3ffff₁₆] ist nicht Teil des Prozessadressraums !



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3.)

3.3 Symbolauflösung – Lader

VI.3/32

Gliederung

Einführung
Semiotik
Informatik

Namensauflösung
Speicheradressen
Pfadnamen

Symbolauflösung
Übersetzer
Binder
Lader

Zusammenfassung



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

4. Zusammenfassung

VI.3/33

Literaturverzeichnis I

- [1] DENNING, P. J.:
Virtual Memory.
In: *Computing Surveys* 2 (1970), Sept., Nr. 3, S. 153–189
- [2] FEIERTAG, R. J. ; ORGANICK, E. I.:
The Multics Input/Output System.
In: *Proceedings of the Third ACM Symposium on Operating System Principles (SOSP 1971)*, October 18–20, 1971, Palo Alto, California, USA, ACM, 1971, S. 35–41
- [3] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Betriebssystemmaschine.
In: [6], Kapitel 5.3
- [4] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Maschinenprogramme.
In: [6], Kapitel 5.2
- [5] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Speicher.
In: [6], Kapitel 6.2



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

4.1 Zusammenfassung – Bibliographie

VI.3/35

Resümee

... Namen sind nicht Schall und Rauch

- **symbolische Bezeichnungen** abstrahieren von konkreten Adressen
 - Programmtext- und -datenstellen, Datei-/Pfadnamen, ... , URL
 - üblich ist die mehrstufige statische und dynamische Auflösung
- den Schwerpunkt bildete die **Namensauflösung** → *dynamisch*
 - eine (reale, logische, virtuelle) Adresse ist Name einer Speicherstelle
 - je nach Abstraktionsebene der Haupt- oder Arbeitsspeicher
 - Seitenadressierung, Segmentierung, seitennummerierte Segmentierung
 - Datei-/Pfadnamen repräsentieren Adressen im Ablagesystem
 - der Namens-/Adressraum ist (nicht nur hier) hierarchisch organisiert
 - Orientierung am Dateisystem: Datei, Verzeichnis, Indexknoten, Verknüpfung
 - systemglobale, weltweite Eindeutigkeit liefert die Internetadresse
- Vorarbeit zu all dem leistet die **Symbolauflösung**: → *statisch*
 - Kompilierer** ■ verteilt Programmtext und -daten auf Programmsegmente
 - Assemblierer** ■ ordnet Programmsymbolen Werte und Attribute zu
 - Binder** ■ platziert das gebundene Programm im Adressraum
 - Lader** ■ legt den „gefüllten“ Adressraum im Arbeitsspeicher ab
- das Zusammenspiel beider Verfahren ist typisch in Rechensystemen
 - nämlich Abbildungsfunktionen, die vor und zur Laufzeit greifen



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

4. Zusammenfassung

VI.3/34

Literaturverzeichnis II

- [6] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. ; LEHRSTUHL INFORMATIK 4 (Hrsg.):
Systemprogrammierung.
FAU Erlangen-Nürnberg, 2015 (Vorlesungsfolien)
- [7] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Virtuelle Maschinen.
In: [6], Kapitel 5.1
- [8] ORGANICK, E. I.:
The Multics System: An Examination of its Structure.
MIT Press, 1972. –
ISBN 0-262-15012-3



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

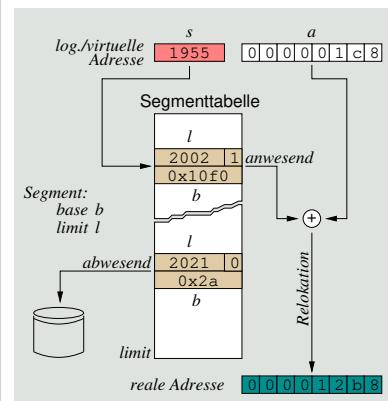
4.1 Zusammenfassung – Bibliographie

VI.3/36

Segmentierung

segmentation

- auf Basis einer einstufigen **Segmenttabelle** als dynamisches Feld:



- s ist **Indexwert**, der gültig ist im Bereich $[0, S_{\text{limit}}]$
 - sei $S = 2^m$ max. Segmentanzahl
 - dann gilt $0 < S_{\text{limit}} \leq S - 1$
- ein möglicher **Indexfehler** muss erkannt werden
 - Grenzwertprüfung auf Basis eines *limit*-Registers (MMU) ist üblich
 - die Tabelle wird (norm.) nicht mit ungültigen Einträgen aufgefüllt
- S hängt ab von der MMU und dem Betriebssystem

- ein **Segmentfehler** (*segment fault*) bedeutet dann verschiedenelei:
 - gültig falls $0 \leq s \leq S_{\text{limit}}$ und $a \leq l$, mit $l = \text{Segmenttabelle}[s].limit$, dann ist s abwesend (*swap-in*) oder ungenutzt (dynamisches Binden)
 - sonst ungültig: Segment s oder Adresse a ist für den Prozess undefined

©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

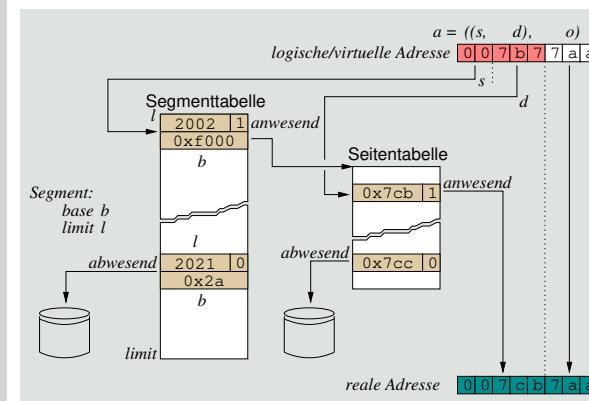
5.1 Anhang – Speicheradressen

VI.3/37

Segmentierte Seitenadressierung

segmented paging

- auf Basis einer einstufigen **Segmenttabelle** als dynamisches Feld:



- die Seitentabelle:
 - ist segmentiert, dynamisches Feld
 - enthält nur gültige Einträge
 - kann ausgelagert sein (*swapping*)

- Adressraum:
 - eindimensional
 - a ist eine lineare Adresse
 - nicht wirklich segmentiert

- mögliche Ausnahme (exception, vgl. [7, 3]) bei der Adressierung:
 - Segmentfehler** ■ falls $s > S_{\text{limit}}$ und $d > l$ (vgl. S. 37) Abbruch
 - Seitenfehler** ■ falls Seite d abwesend (vgl. S. 13) Wiederaufnahme

©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

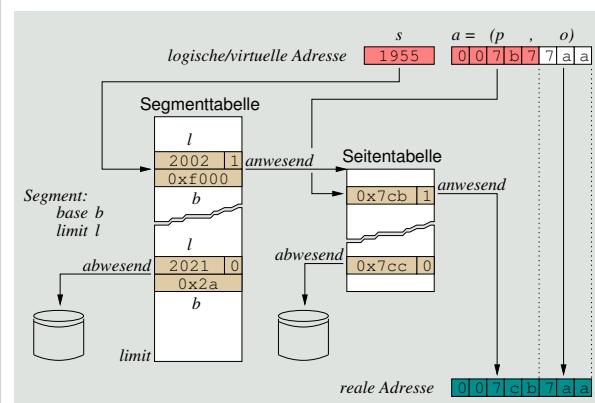
5.1 Anhang – Speicheradressen

VI.3/38

Seitenummerierte Segmentierung I

paged segmentation

- à la GE645/Multics, einstufige **Segmenttabelle**, dynamisches Feld:



- die Seitentabelle:
 - ist segmentiert, dynamisches Feld
 - enthält nur gültige Einträge
 - kann ausgelagert sein (*swapping*)
- Adressraum:
 - zweidimensional
 - a hat zwei Komponenten
 - stark segmentiert

- Ausnahmen wie bei segmentierter Seitenadressierung (vgl. S. 38)
 - hohe Segmentanzahl fördert **dynamisches Binden** (Text, Daten) und **Mitbenutzung** (*sharing*) von Programm- und Datenstrukturen
 - Seiten behalten ihre ureigene Bedeutung: Entitäten des virtuellen Speichers

©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

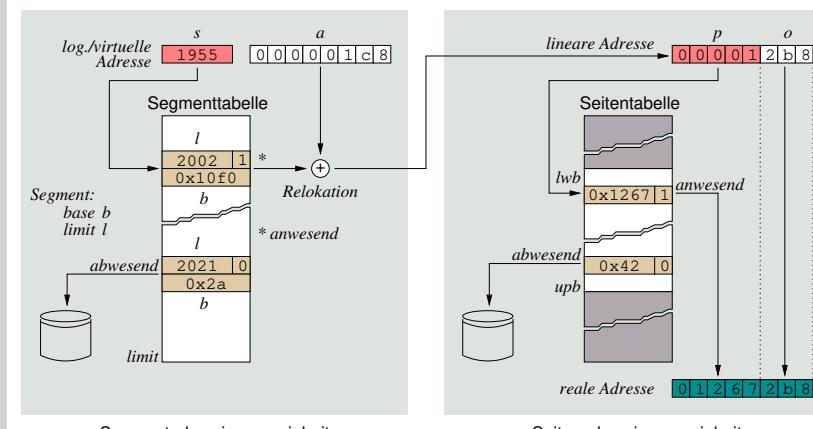
5.1 Anhang – Speicheradressen

VI.3/39

Seitenummerierte Segmentierung II

paged segmentation

- à la IA-32, **Reihenschaltung** von Adressumsetzungseinheiten:



- Ausnahmen wie bei segmentierter Seitenadressierung (vgl. S. 38)
 - ein-/mehrstufig ausgelegte (auslagerbare) Seitentabelle, **statisches Feld**
 - unterstützt die **partielle Mitbenutzung** eines einzelnen Seitenrahmens

©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

5.1 Anhang – Speicheradressen

VI.3/40

Seitennummerierte Segmentierung: Unterschiede

- segmentierte Seitentabelle
 - der Segmentdeskriptor listet **Seitendeskriptoren**
 - er adressiert damit indirekt ein dynamisches Seitenfeld
 - alle Seiten darin sind gültig für den betreffenden Prozess
 - folglich auch alle Bytes eines jeweiligen Seitenrahmens
 - Fußbereiche von Seitenrahmen können jedoch brach liegen
 - ↪ Seitenverschnitt unvermeidbar
- Verschnitt im Seitenrahmen (bei Reihenschaltung) zu vermeiden, ist für gewöhnlich aufwendig und verstärkt zudem **Interferenz**
 - zwei Seiten ggf. zweier Segmente haben Anteile desselben Seitenrahmens
 - Ersetzung des Inhalts dieses Seitenrahmens kann zwei Prozesse „stören“
 - auch sind Löcher dann kein Vielfaches von Seitenrahmen mehr
 - ↪ Verschnitt im Hauptspeicher unvermeidbar: **externe Fragmentierung**



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

5.1 Anhang – Speicheradressen

VI.3/41

- Reihenschaltung
 - der Segmentdeskriptor listet **Speicherworte**
 - er adressiert damit direkt ein dynamisches Bytefeld
 - alle Bytes darin sind gültig für den betreffenden Prozess
 - dies unabhängig davon, welche Seitenrahmen sie aufnehmen
 - folglich können Seitenrahmen partiell mitbenutzt werden
 - ↪ Verschnitt darin vermeidbar

Partielle Mitbenutzung von Seitenrahmen

- Platzierung von Segmentkopf und -fuß in denselben Seitenrahmen F , wobei Kopf- plus Fußlänge die Seitenrahmenlänge (4 KiB) ergibt
 - **erste Seite** ■ $P_{[0,4053]}^Y$, Kopf in Segment S^Y , liegt auf $F_{[42,4095]}^Z$
 - **letzte Seite** ■ $P_{[0,41]}^X$, Fuß in Segment S^X , liegt auf $F_{[0,41]}^Z$
 - dabei können S^X und S^Y demselben Adressraum (eines Prozesses) oder verschiedenen Adressräumen (zweier Prozesse) angehören
 - falls derselbe Adressraum, kann sogar $S^X = S^Y$ gelten, d.h., Kopf und Fuß desselben Segments liegen im selben Seitenrahmen
- zu beachten ist, dass sich die **lineare Adresse** des Segmentkopfes auf einen gekachelten logischen/virtuellen Adressraum bezieht
 - diese Adresse ist die im Segmentdeskriptor stehende Segmentbasis und sie muss überhaupt nicht seitenausgerichtet (*page aligned*) sein
 - innerhalb der ersten Seite in diesem Adressraum kann die Segmentbasis um einen Wert $v \in [0, \text{sizeof}(P) - 1]$ verschoben sein
 - dieser Wert v entspricht dann der Größe eines zugeteilten Speicherstücks (Segmentfuß) am Anfang eines Seitenrahmens
 - der Rest von $\text{sizeof}(P) - v$ Bytes in dem Seitenrahmen entspricht einem Speicherstück, dass einem Segmentkopf zugeteilt werden könnte



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

5.1 Anhang – Speicheradressen

VI.3/42

Seitenadressierung mit Segmentierung

... hat Mehrkosten

- **Synergie** der vorteilhaften Merkmale beider Adressumsetzungsarten
 - einfache Platzierungsstrategie, da die Speicherzuteilung kachelorientiert und damit immer in Einheiten gleicher Größe geschieht (vgl. [5, S. 18])
 - mehrstufige Seitentabellen fallen weg, da alle Tabellen Segmente und so jeweils in ihrer wirklichen Seitenanzahl beschränkt sind
 - bessere Trennung von Belangen, da Segmente und Seiten bzw. Kacheln verschiedenen Zielen dienen
- Segment – Abbildung und Erfassung von **Programmstrukturen**
■ Seite – Optimierung von **Systemfunktionen** der Speicherverwaltung

- Segmentierung unterstützt insbesondere **dynamisches Binden**
 - die „Bindlinge“ sind symbolisch bezeichnete, **physische Segmente**
 - d.h., Programmstrukturen, Adressräume (Seitentabellen), ..., Dateien
- ein Segment dagegen als „Seitenfeld“ zu begreifen, ist etwas anderes
 - also Seiten zu Text-, Daten- oder Stapelsegmenten zusammenstellen⁷
 - Programmstrukturen lassen sich damit im System nicht wirklich abbilden

⁷ So, wie es von UNIX-ähnlichen Betriebssystemen (inkl. Linux) bekannt und überhaupt nach Multics [8] eben nur noch gang und gäbe ist.



©wosch SP (SS 2021, B – VI.3)

5.1 Anhang – Speicheradressen

VI.3/43

Verknüpfungen überarbeitet

Gegenüberstellung

- **feste Verknüpfung**
 - nicht zu Verzeichnissen oder Dateien anderer Dateisysteme
 - überdauert die Umplatzierung einer Datei
 - bleibt bestehen, nur solange es noch Referenzen gibt
 - hat keinen eigenen Indexknoten
- **symbolische Verknüpfung**
 - auch zu Verzeichnissen und Dateien anderer Dateisysteme
 - ungültig nach Umplatzierung einer Datei
 - bleibt bestehen, auch wenn es keine Referenzen gibt
 - hat einen eigenen Indexknoten

„Nicht alles, was glänzt, ist Gold“ (Shakespeare, 1600)

```
wosch@lorien 1$ mkdir -p Laptop/faui43w; cd Laptop; ln -s faui43w lorien; ls -l
total 8
drwxr-xr-x 2 wosch wosch 68 29 Apr 13:01 faui43w
lrwxr-xr-x 1 wosch wosch 7 29 Apr 13:02 lorien -> faui43w
wosch@lorien 2$ cd lorien
wosch@lorien 3$ cd ..; rmdir faui43w; cd lorien
-bash: cd: lorien: No such file or directory
wosch@lorien 4$ ls -l
total 8
lrwxr-xr-x 1 wosch wosch 7 29 Apr 13:02 lorien -> faui43w
wosch@lorien 5$ mkdir faui43w; cd lorien
wosch@lorien 6$ ln -s Fata\ Morgana SP1
```



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

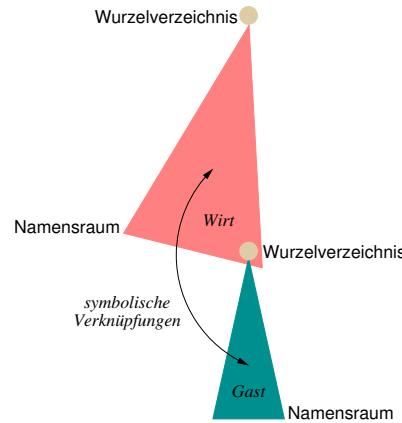
5.2 Anhang – Pfadnamen

VI.3/44

Namensraumverbindung

Dateisystem ein-/aushängen

- Namensräume können an einem **Befestigungspunkt** (*mount point*) miteinander verbunden werden
 - ohne damit jedoch eine Erweiterung des Namensraums vorzunehmen
- der Punkt ist ein **Verzeichnis** im Wirtsnamensraum
 - Einhängen (*mount*) blendet den Inhalt des Wirtsverzeichnisses aus
 - der Wurzelverzeichnisinhalt des Gastnamensraums erscheint
 - Aushängen (*umount*) macht den alten Verzeichnisinhalt sichtbar
- ein **Pfadname** kann dann Wirts- und Gastnamensraum abdecken
 - einerseits streng hierarchietreu, von oben nach unten (*top down*)
 - andererseits quer verweisend, durch **symbolische Verknüpfung**



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

5.2 Anhang – Pfadnamen

VI.3/45

Adresse als Nummer

Ergebnis einer Nummerung

Definition (Nummerung (DIN 6763))

Bilden, Erteilen, Verwalten und Anwenden von Nummern.

- die **Eindeutigkeit** der Speicher- und Standortadressen ist begrenzt
 - Indexknotennummern durch den **Namensraum** ihres Dateisystems
 - reale, logische und virtuelle Adressen durch ihren (Prozess-) **Adressraum**
 - Prozesskennungen durch den **Nummernraum** ihres Rechensystems
- die **Internetprotokolladresse** (IP-Adresse) ist weltweit eindeutig
 - IPv4 ■ 32 Bit: vier Blöcke zu jeweils drei Dezimalstellen (8 Bit)
 - IPv6 ■ 128 Bit: acht Blöcke zu jeweils vier Hexadezimalstellen (16 Bit)
 - vom ARP (*address resolution protocol*) aufgelöst und umgewandelt in die **Netzwerkadapteradresse** (MAC, *media access control*)
 - rechensystemlokal wird das Adressenpaar in der ARP-Tabelle hinterlegt
- verallgemeinerte Form ist der/die **URL** (*universal resource locator*)
 - neben Adressinformationen ist zusätzlich die **Zugriffsmethode** enthalten, die durch :// von den schemaspezifischen Angaben getrennt ist
 - die Internetadresse identifiziert dabei den **Wirt** (*host*) einer Webanfrage



©wosch

SP (SS 2021, B – VI.3)

5.3 Anhang – Internetadressen

VI.3/46