Systemprogrammierung

Grundlagen von Betriebssystemen

Teil B – VI.3 Betriebssystemkonzepte: Adressbindung

Wolfgang Schröder-Preikschat

30. Juni 2022

Agenda

Einführung
- Semiotik
- Informatik

Namensauflösung
- Speicheradressen
- Pfadnamen

Symbolauflösung
- Übersetzer
- Binder
- Lader

Zusammenfassung

Gliederung

- 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

  $\hookrightarrow$ 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** Ebene$_5$

$\hookrightarrow$ *compile time binding*

Ladezeit
- Programme enthalten relative/verschiebbare Adressen
- verlagert mit **Lader** Ebene$_3$

$\hookrightarrow$ *load time binding*

Ausführungszeit
- Programme enthalten relative/verschiebbare Adressen
- verlagert mit **Adressumsetzungseinheit**[1] Ebene$_2$

$\hookrightarrow$ *execution time binding*, *run-time binding*

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

Name $\Longleftrightarrow$ Symbol $\Longleftrightarrow$ Adresse

Definition (`www.duden.de`)

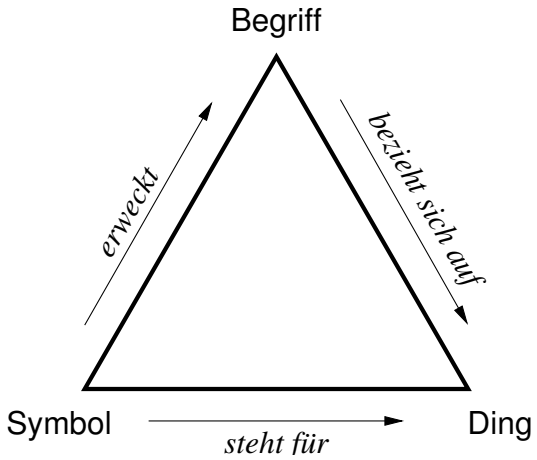
Kennzeichnende Benennung eines Einzelwesens, Ortes oder Dinges, durch die es von anderen seiner Art unterschieden wird; Eigenname.

- 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

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

- durch Kompilierer, Assemblierer und Binder (Ebene$_5$ $\mapsto$ Ebene$_3$)
  - symbolische (Text, Daten) auf numerische Referenz
- durch Betriebssystem (Ebene$_3$ $\mapsto$ Ebene$_2$)
  - 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 Referenz[2]
    - 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 Ebene$_5$ $\mapsto$ Ebene$_2$ ganzheitlich zu sehen:

$\hookrightarrow$ symbolische Referenz auf virtuelle, logische oder reale Adresse.

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

Gliederung

Adresse als Synonym

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

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

Den Ziffern allein ist der wirkliche Ort nicht anzusehen.

- 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 Geräteregister, Bildspeicher oder **Dateien**
  - der Zugriff läuft dann über Lese-/Schreibaktionen der Befehlssatzebene

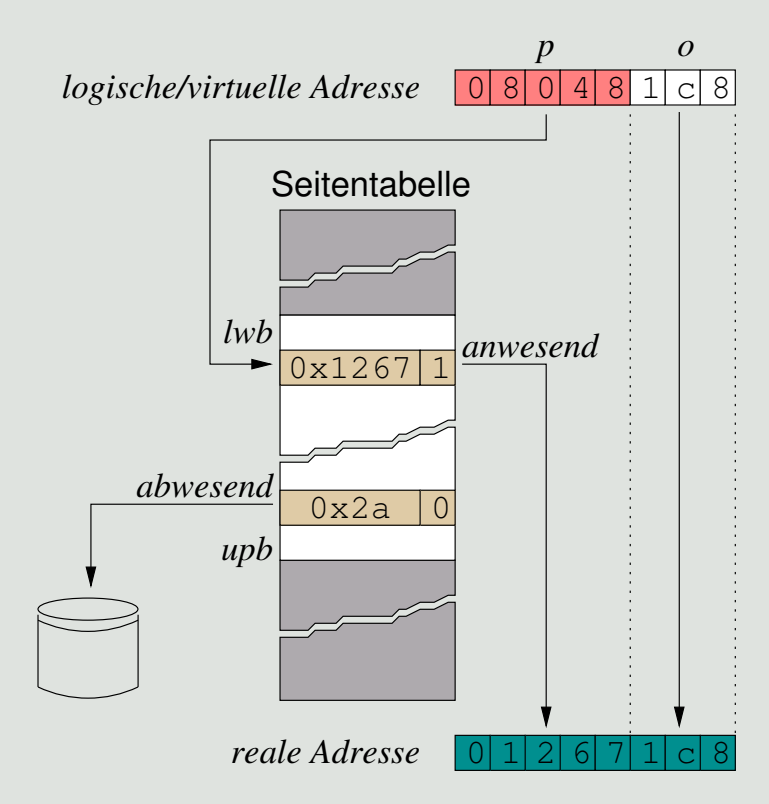
Organisation des Namensraums

- **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*)
    Seitennummer $p = [0, 2^{n-w} - 1]$, mit $32 \leq n \leq 64$, Tabellenindex
  - eine gewöhnliche **lineare Adresse** $\rightsquigarrow$ **eindimensionaler Adressraum**
    - d.h., Oktetts oder Worte in einer Dimension aufgereiht
- **Segmentierung** (*segmentation*) mittels **Segmenttabelle**
  - jede Adresse ist repräsentiert als Zweitupel $A_s = \langle s, d \rangle$, 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 $\rightsquigarrow$ **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 $p = (s, d)$
  - **seitennummerierte Segmentierung** (*paged segmentation*)
    - die Segmente sind seitennummeriert, d.h., $A_s = \langle s, d \rangle$ mit $d = (p, o)$ oder die Segmenteinheit generiert eine lineare Adresse A_p für die Seiteneinheit

Seitenadressierung

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



  - p ist **Indexwert** für gültige Seiten im Bereich $[P_{lwb}, P_{upb}]$
    - sei $P = 2^{n-i}$ max. Seitenanzahl
    - dann gilt $0 \leq P_{lwb} < P_{upb} \leq P - 1$
  - ein möglicher **Indexfehler** muss erkannt werden
    - Tabelle auffüllen mit Einträgen, die Abbildungsfehler erzwingen
    - Grenzwertprüfung auf Basis eines *limit*-Registers ist unüblich
  - P hängt ab von Seitengröße 2^i und bestimmt die Stufenanzahl

- 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

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-, stromorieniert
    Zustandsdaten – Prozesstabelle, 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

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 werden[3]

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

Alphabet und Wortlänge

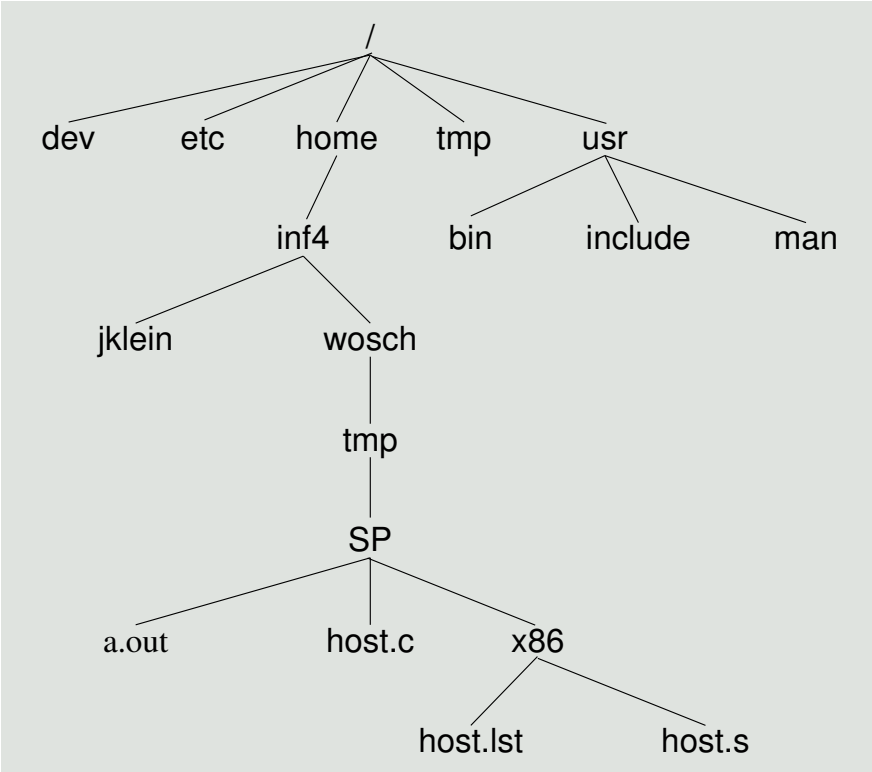
Jedes Programm (inkl. das Betriebssystem) kann eigenen Ressourcen Zeichenketten zuordnen und Prozessen diese bekanntgeben.

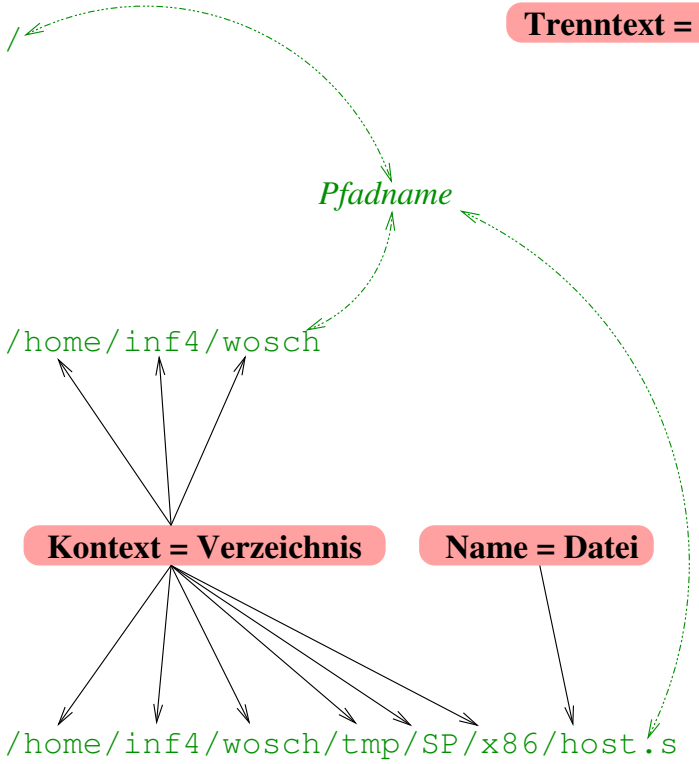
- den **Zeichenvorrat** für Namen und Komponenten eines Pfadnamens gibt die Namensverwaltung des Betriebssystems vor
  - allgemein die Menge der druckbaren Zeichen (ASCII) ohne Trennzeichen[4]
  - je nach Betriebssystem gibt es weitere Ausnahmen ($^- = \{", *, /, ?, |\}$)
- genau genommen werden Bezeichnungen 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 $2^{15} - 1$ Zeichen pro Pfadname in Windows

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

Hierarchischer Namensraum I

Dateibaum (*file tree*)





- ein **Kontext** repräsentiert einen Namensraum flacher Struktur
  - darin muss Eindeutigkeit mit der Namenswahl selbst gewährtleistet 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

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 Systems[5]
    - Einstiegspunkt in, aber auch „Steckverbinder“ für, den Namensraum
  - **Heimatverzeichnis** (*home directory*) eines authorisierten Benutzers
    - initiales Arbeitsverzeichnisses nach erfolgter Anmeldung (*login*)
  - **Arbeitsverzeichnis** (*working directory*) eines zugelassenen Prozesses
    - gegenwärtiger, relativer Standort des Prozesses im Namensraum

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

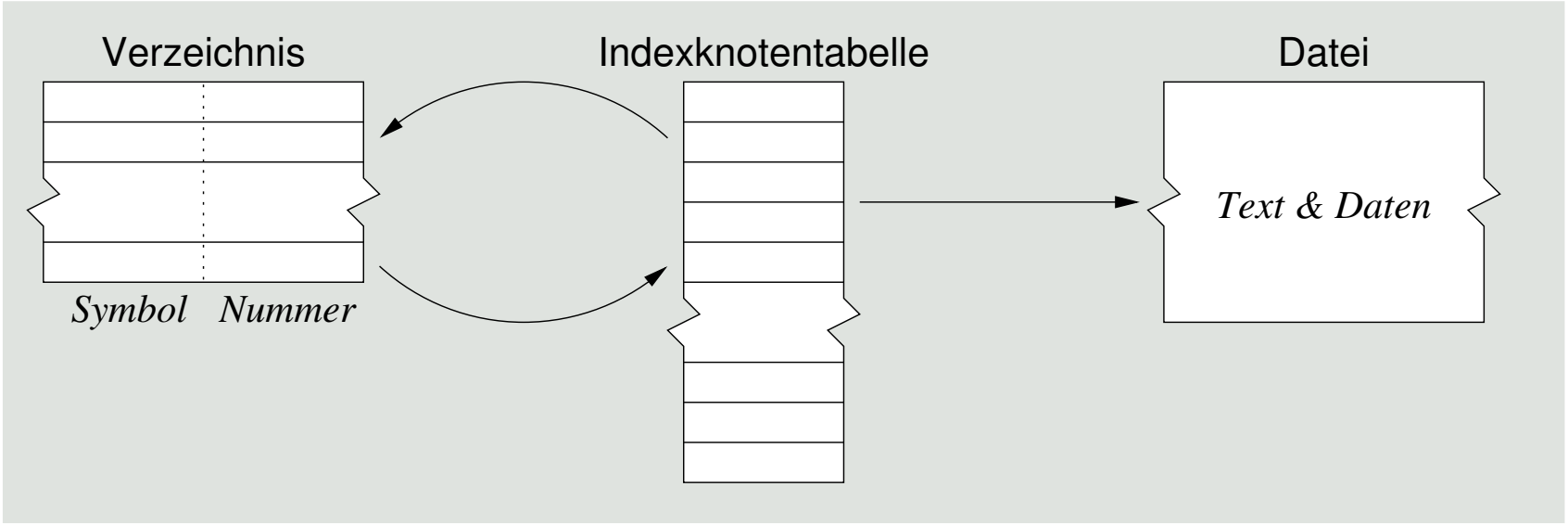
Informationsstruktur

- 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 $\leadsto$ zeichen-/blockorientiertes Gerät, Pseudogerät, Treiberklasse
    - reguläre Datei $\leadsto$ 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.

Datenstrukturen im Namensraum



- 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

Verzeichniseintrag I

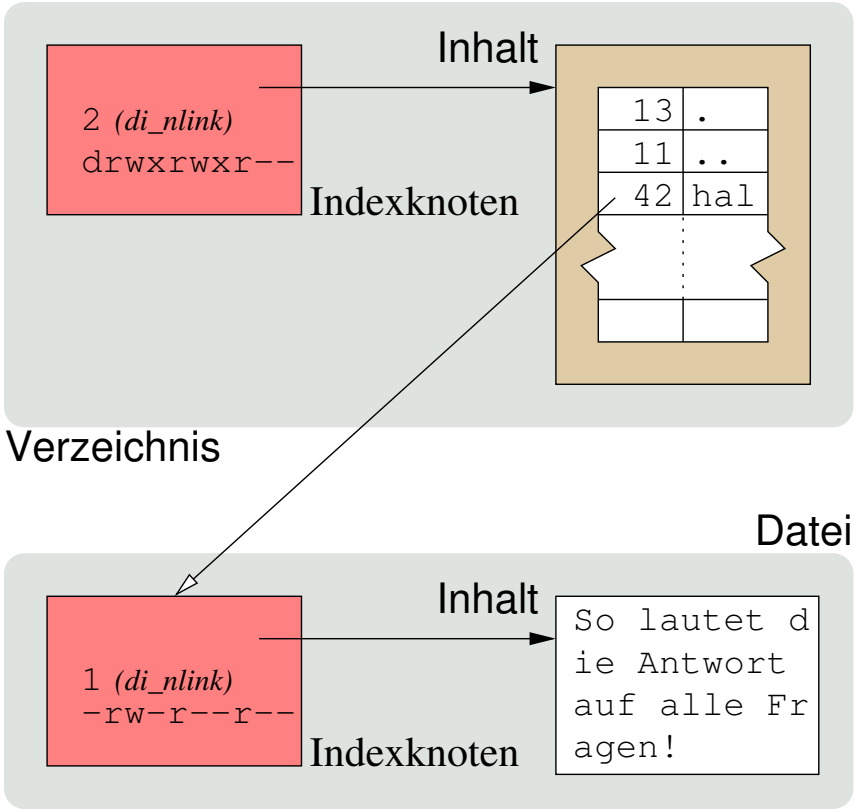
- die **feste Verknüpfung** (*hard link*) von einem Dateinamen mit einer Indexknotennummer (UNIX V7, `dir.h`):

```
1  typedef unsigned short ino_t;
2
3  #define DIRSIZ 14
4
5  struct direct {
6      ino_t d_ino;
7      char  d_name[DIRSIZ];
8  };
```

  - eine als **Wertepaar** gespeicherte **surjektive Abbildung**
  - mehrere Paare können zum selben Indexknoten (`d_ino`) zeigen
  - im selben Verzeichnis jedoch mit verschiedenen Namen (`d_name`)
  - 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

Verzeichniseintrag II

- ein Namenverzeichnis 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

Bindung und Auflösung

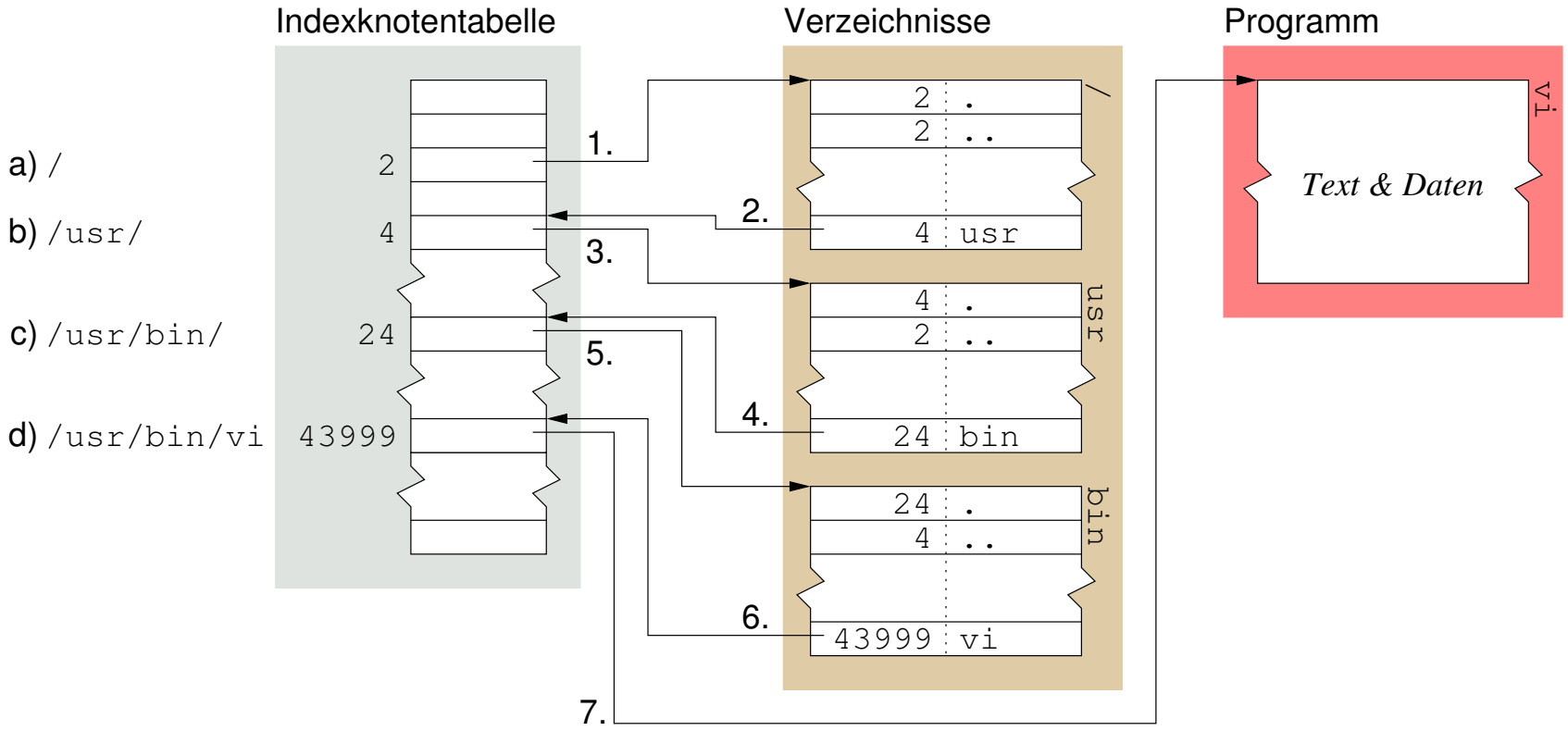
Abbildung $f : N_{symbolisch} \mapsto N_{numerisch}$

- **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.*

Auflösung am Beispiel von /usr/bin/vi



a) Wurzelverzeichnis des Namensraums öffnen
b) darin Namenseintrag `usr` suchen, ist ein Verzeichnis, öffnen
c) darin Namenseintrag `bin` suchen, ist ein Verzeichnis, öffnen
d) darin Namenseintrag `vi` suchen, ist ein Programm, öffnen

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 $f : N^d_{symbolisch} \mapsto N^z_{symbolisch}$ 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 selbst[6]
- Ursprung ist der **symbolische Name** (*symbolic name*) in Multics [2]
  - zur dynamischen Bindung von Namen an (besondere) E/A-Geräte

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

Gliederung

Adresse als Symbol

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

- 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 Machinenkodes, zwei Schritte:
  - Kompilierung des Quellkodes in eine andere symbolische Darstellung
  - Assemblierung und Bindung in die benötigte numerische Auslegung

Programmkopf

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

```
1           .file   "host.c"
2           .section        .rodata.str1.1,"aMS",@progbits,1
3   .LC0:
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 lesbares (`"aMS"`) **Datensegment** (2–6)
  - Symbole `.LC0` 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 Prozessadressraum stehen noch aus
  - konkrete Werte für die Symbole und die einzelnen Maschinenbefehle

Programmfuß

- 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
```

82 - dem Symbol `main` die Länge des Programmtextes zuweisen
84 - 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 „undefinierten 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 undefinierten 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

Programmrumpf

- **Auflistung** (*listing*) der Übersetzungseinheit nach der Assemblierung (Ausschnitt des Quellprogramms von S. 27, dort Zeilen 3–6)

```
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

Maschinenprogramm

- 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` $\rightsquigarrow$ `gethostbyname`
    `0x48d1a4` $\rightsquigarrow$ `.LC0`
    `0x401120` $\rightsquigarrow$ `printf`
  - allen Text- und Datenelementen wurden **absolute Adressen** zugewiesen
    - der Programmausschnitt liegt im Adressbreich $[4003e9_{16}, 400406_{16}]$
    - 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

Adressraummodell des Betriebssystems

- **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  7f03d63ad000-7f03d6f82000 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-ffffffffff601000 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 $\approx$ 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 $[0, 3fffff_{16}]$ ist nicht Teil des Prozessadressraums !

Gliederung

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

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

Literaturverzeichnis II

[6] Kleinöder, J. ; Schröder-Preikschat, W. ; Lehrstuhl Informatik 4 (Hrsg.):
Systemprogrammierung.
FAU Erlangen-Nürnberg, 2015 (Vorlesungsfolien)

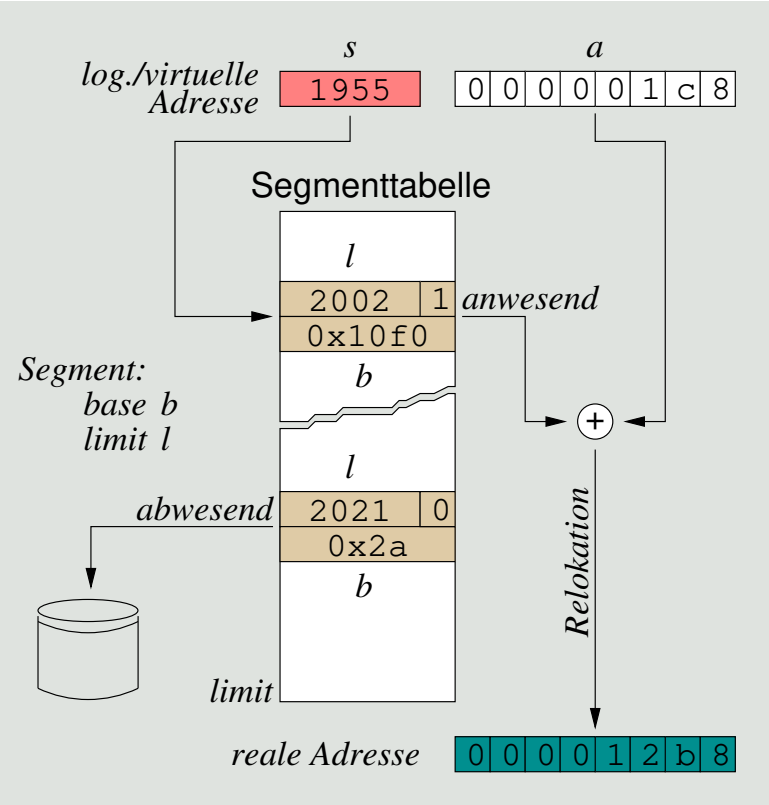
[7] Kleinöder, J. ; Schröder-Preikschat, W. :
Virtuelle Maschinen.
In: [6], Kapitel 5.1

[8] Organick, E. I.:
The Multics System: An Examination of its Structure.
MIT Press, 1972. –
ISBN 0–262–15012–3

Segmentierung

segmentation

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



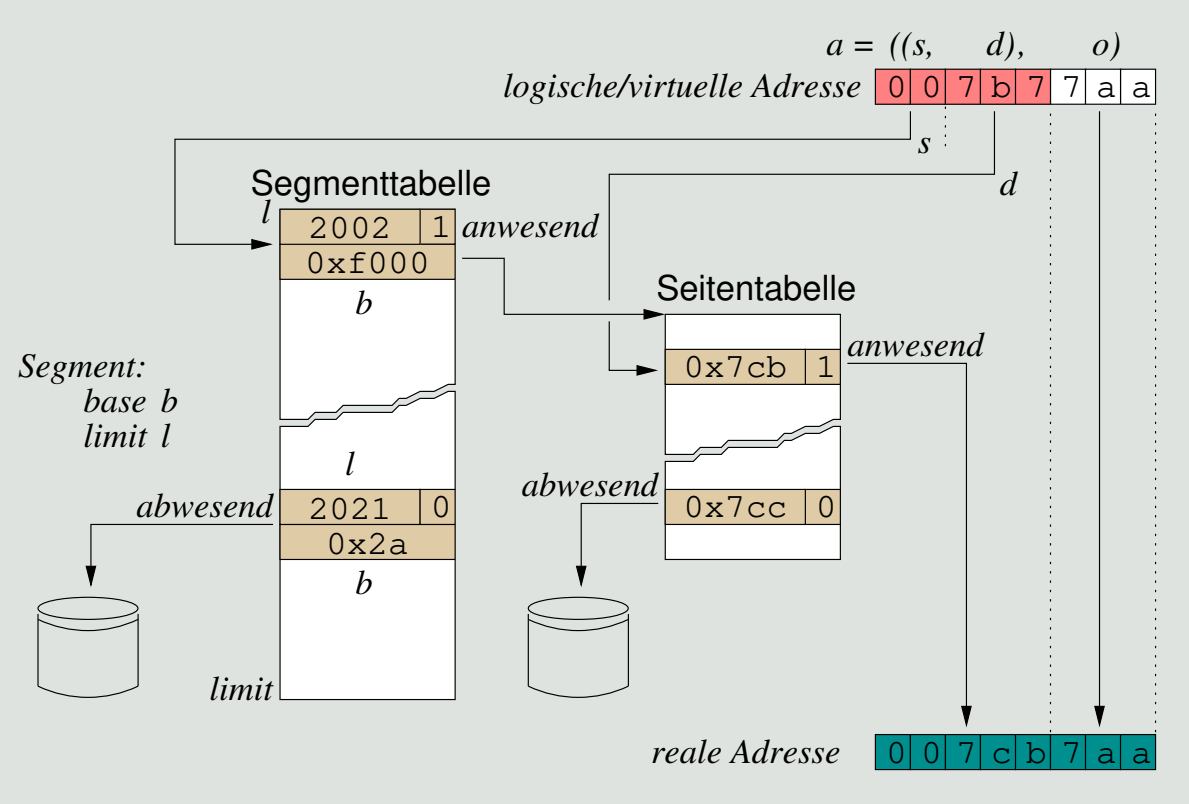
  - s ist **Indexwert**, der gültig ist im Bereich $[0, S_{limit}]$
    - sei $S = 2^m$ max. Segmentanzahl
    - dann gilt $0 < S_{limit} \leq S - 1$
  - ein möglicher **Indexfehler** muss erkannt werden
    - Grenzwertprüfung auf Basis eines *limit*-Registers (MMU) ist üblich
    - die Tabelle wird (norm.)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

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

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 !

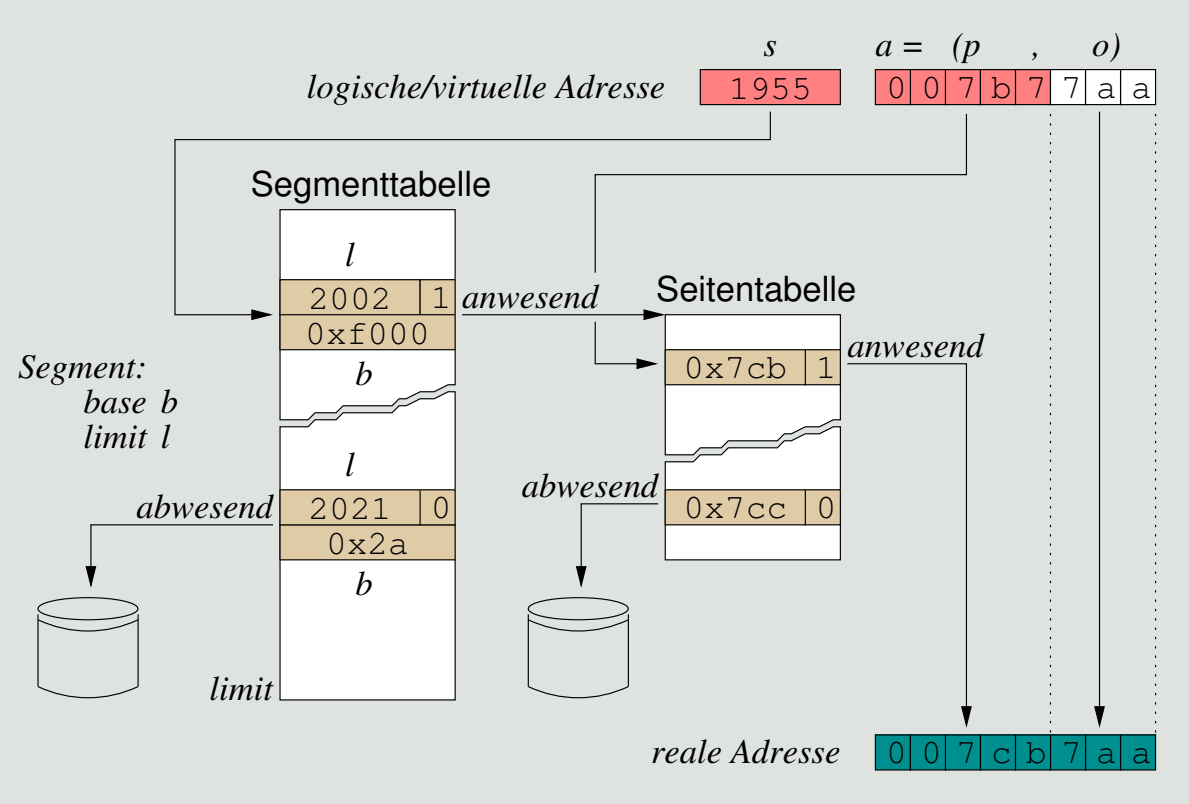
- mögliche Ausnahme (*exception*, vgl. [7, 3]) bei der Adressierung:

Segmentfehler	falls $s > S_{limit}$ und $d > l$ (vgl. S. 37)	Abbruch
Seitenfehler	falls Seite d abwesend (vgl. S. 13)	Wiederaufnahme

Seitennummerierte Segmentierung I

paged segmentation

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



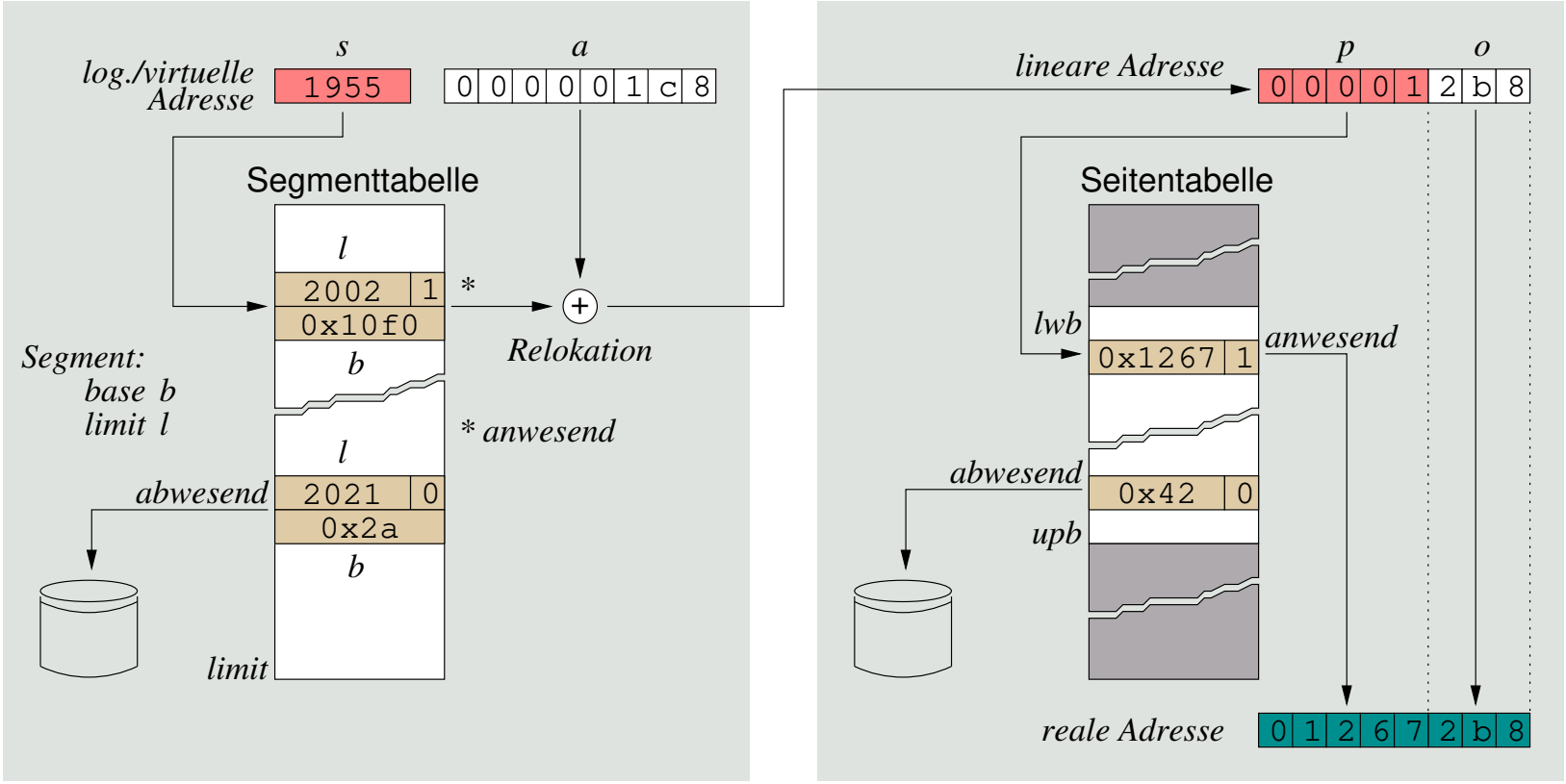
  - die Seitentabelle:
    - ist segmentiert, dynamisches Feld
    - enthält nur gültige Einträge
    - kann ausgelagert sein (*swapping*)
  - Adressraum:
    - zweidimensional
    - *a* hat zwei Komponenten
    - stark segmentiert

- 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 ureigne Bedeutung: Entitäten des virtuellen Speichers

Seitennummerierte Segmentierung II

paged segmentation

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



Segmentadressierungseinheit

Seitenadressierungseinheit

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

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
- 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
- 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**

Partielle Mitbenutzung von Seitenrahmen

- Platzierung von Segmentkopf und -fuß in denselben Seitenrahmen F, wobei Kopf- plus Fußlänge die Seitenrahmenlänge (4 KiB) ergibt

  erste Seite
  - $P^y_{[0,4053]}$, Kopf in Segment S^y, liegt auf $F^z_{[42,4095]}$

  letzte Seite
  - $P^x_{[0,41]}$, Fuß in Segment S^x, liegt auf $F^z_{[0,41]}$
  - 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 $v \in [0, sizeof(P) - 1]$ verschoben sein
  - dieser Wert v entspräche dann der Größe eines zugeteilten Speicherstücks (Segmentfuß) am Anfang eines Seitenrahmens
  - der Rest von $sizeof(P) - v$ Bytes in dem Seitenrahmen entspräche einem Speicherstück, dass einem Segmentkopf zugeteilt werden könnte

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 zusammenstellen[7]
  - Programmstrukturen lassen sich damit im System nicht wirklich abbilden

    – vom Verwaltungsaufwand mehrstufiger Seitentabellen einmal abgesehen

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

Verknüpfungen überarbeitet

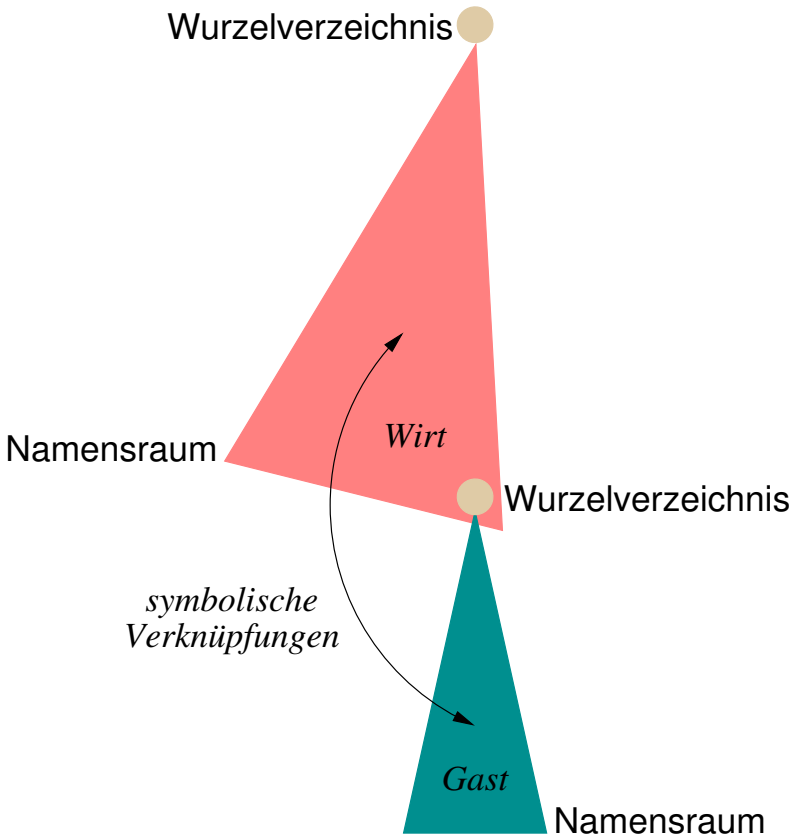
- feste Verknüpfung
  - nicht zu Verzeichnissen oder Dateien anderer Dateisysteme
  - überdauert die Umplatzierung einer Datei
  - bleibt bestehen, nur solange es noch Referenzen gibt
  - hat keinen eigenen Indexknoten
- symbolische Verknüpfung
  - auch zu Verzeichnissen und Dateien anderer Dateisysteme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

Namensraumverbindung

- 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 (*unmount*) 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**



Adresse als Nummer

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 Rechensystem
- 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