Betriebssystemtechnik

Adressräume: Trennung, Zugriff, Schutz

I. Einleitung

Wolfgang Schröder-Preikschat / Volkmar Sieh

SS 2024

Gliederung

Schutz von Prozessen

~ **in räumlicher Hinsicht** ⇝ BST

- Angriffssicherheit (*security*)
  - Schutz einer Entität vor seiner Umgebung
  - Immunität
  - verhindern, in einen Adressraum einbrechen zu können
- Betriebssicherheit (*safety*)
  - Schutz der Umgebung vor einer Entität
  - Isolation
  - verhindern, aus einem Adressraum ausbrechen zu können

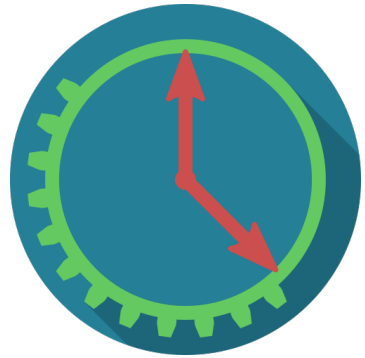
~ **in zeitlicher Hinsicht** ⇝ EZS[3]

- Einhaltung von Terminen, Vermeidung von Interferenzen

~ **in energetischer Hinsicht**

- Abfederung von Energiespitzen, Einhaltung von Energiebudgets

JITTY



- Linux-binär-kompatibler Betriebssystemkern
- programmiert von Mitarbeitern und Studentinnen und Studenten
- „sauberer” Source-Code
- nur ca. 150k LOC (inkl. vielen Kommentaren)
- Code für Lehrstuhlprojekte
- Beispiel-Code für BS und BST
- `https://gitlab.cs.fau.de/i4/jitty/jitty-os.git`

Prozess

Definitionen:

Ablaufumgebung (Task):

Menge von Code, Daten, offene Dateien, usw.

Aktivitätsträger (Thread):

Einheit, die Code ausführen kann

traditioneller Unix Prozess:

eine Ablaufumgebung mit *einem* Aktivitätsträger

hier: Prozess:

eine Ablaufumgebung mit *ggf. mehreren* Aktivitätsträgern

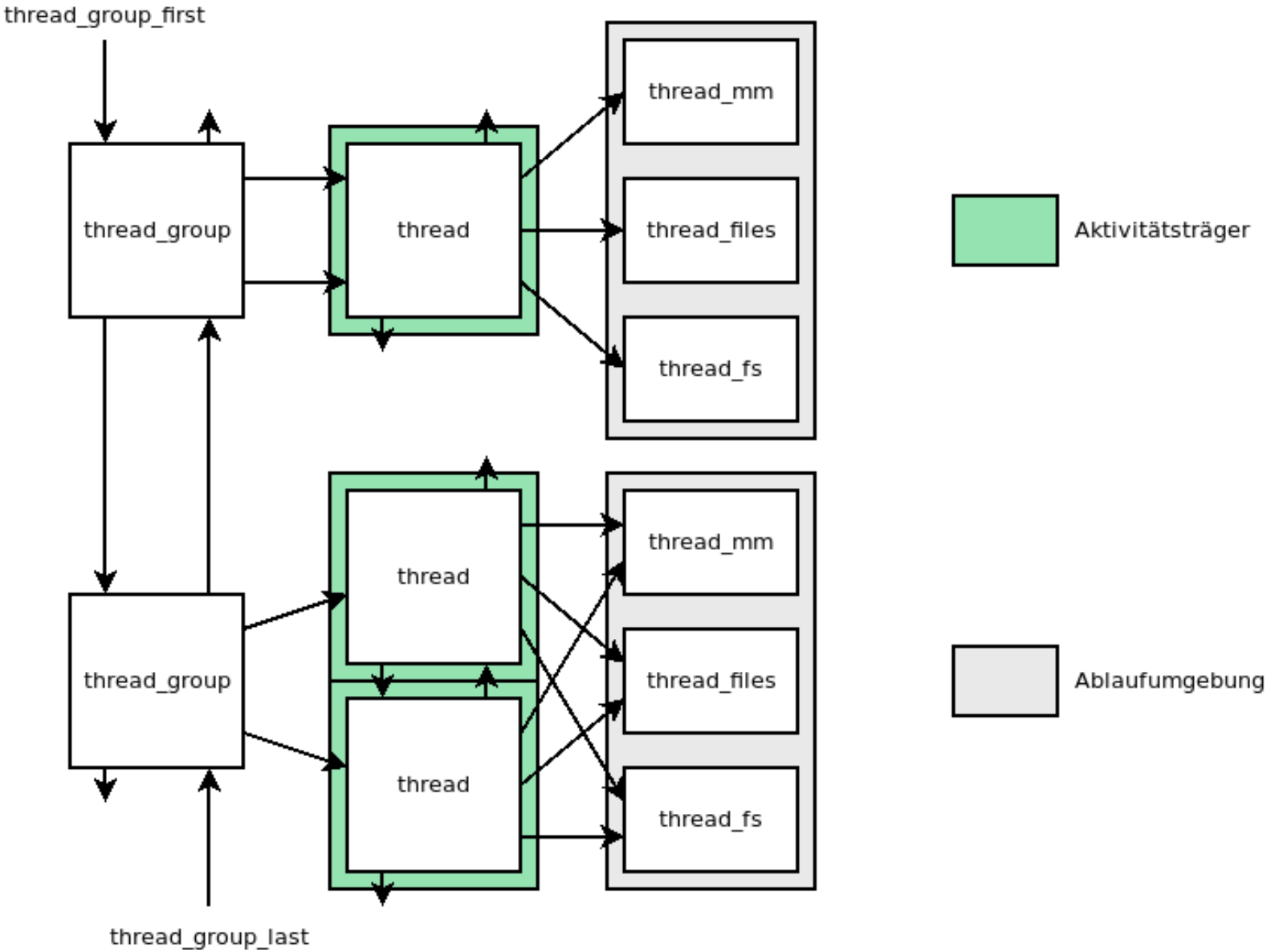
Prozess – Beispiel JITTY

Feingranulare Unterteilung der Ablaufumgebung:

```
1  struct thread {
2    struct thread *prev;
3    struct thread *next;
4    ...
5    struct thread_mm *mm;
6    struct thread_files *files;
7    struct thread_fs *fs;
8    ...
9    long reg[8];
10   uint8_t stack[16*1024];
11 };
12
13 struct thread_group {
14   struct thread_group *prev;
15   struct thread_group *next;
16   ...
17   struct thread_group *parent;
18   struct thread_group *child_first;
19   struct thread_group *child_next;
20   ...
21   struct thread *first;
22   struct thread *last;
23 };
```

```
1  struct thread_mm {
2    ...
3    struct mm_reg *reg_first;
4    struct mm_reg *reg_last;
5  };
6
7  struct thread_files {
8    ...
9    struct file *file[256];
10 };
11
12 struct thread_fs {
13   ...
14   struct dentry *root;
15   struct dentry *cwd;
16 };
17
18 struct thread_group *thread_group_first;
19 struct thread_group *thread_group_last;
```

Prozess – Beispiel JITTY



Adressraum

(vgl. auch [4])

- realer ∼
  - reflektiert die phys(ikal)ischen Eigenschaften des Rechensystems
  - nicht zu jeder Adresse gibt es einen Adressaten (Speicher, Geräte)
  - die Bindung zwischen beiden ist fest, zur Laufzeit unveränderlich
    - Vorsicht: Speicherbankumschaltung oder PCI-Config-Space
  - ungültige Adressen implizieren undefiniertes/fehlerhaftes Verhalten
    - Vorsicht: Probing von Geräten beim Booten
    - Vorsicht: ggf. „Bus-Error"-Exceptions
- logischer ∼
  - reflektiert die strukturellen Eigenschaften eines Programms
  - zu jeder Adresse gibt es immer einen (speicher-) residenten Adressaten
  - die Bindung zwischen beiden ist jedoch lose, zur Laufzeit veränderlich
    - *Beispiele*: brk, sbrk, mmap, munmap, malloc, free, Stack
  - ungültige Adressen – innerhalb des Adressraums – gibt es nicht
    - Vorsicht: Unterschied zwischen Segmentierung und Seitennummerierung
- virtueller ∼
  - reflektiert die gegenwärtige/zukünftige Auslastung des Rechensystems
  - zu einer Adresse kann es zeitweilig einen nichtresidenten Adressaten geben
  - ansonsten „erben" die Adressen alle Eigenschaften logischer Adressräume

Adressen

Beispiel Intel:

Segment-Nummer und Offset

||
V

lineare Adresse

||
V

physikalische Adresse

virtuelle Adresse?

realer Adressraum

Beispiel IBM-AT:

0x00000000	0x0009ffff	DRAM
0x000a0000	0x000b7fff	reserviert für VGA-Grafik
0x000b8000	0x000bffff	VGA-Text
0x000c0000	0x000cffff	VGA-BIOS
0x000d0000	0x000dffff	reserviert für z.B. BIOS-Ext.
0x000e0000	0x000fffff	BIOS
0x00100000	0x00efffff	DRAM
0x00f00000	0x00ffffff	reserviert für ISA-I/O
0x01000000	?	DRAM
0xfffe0000	0xffffffff	BIOS

Was passiert bei Zugriff auf nicht zugewiesene Speicherbereiche?

Adressraumtrennung

Segmentierung oder Eingrenzung von Programmen:

- Maschinenprogrammebene
  - der Prozessor ermöglicht Immunität/Isolation in Hardware
    - MMU (Abk. *memory management unit*) . . . . . logischer Adressraum
    - MPU (Abk. *memory protection unit*) . . . . . phys(ikal)ischer Adressraum
  - das Betriebssystem programmiert diese Hardware problemspezifisch
- Programmiersprachenebene
  - der Compiler ermöglicht Immunität/Isolation in Software
    - Programme liegen in einer typsicheren Programmiersprache vor
    - Ahead-of-Time-Compiler checkt, compiliert und *signiert*
    - Betriebssystem checkt Signatur vor Start
- Byte-Code-Ebene
  - ein Just-in-Time-Compiler ermöglicht Immunität/Isolation in Software
    - Compiler generiert *Byte-Code*
    - Byte-Code liegt in einem statisch checkbaren Format vor
    - Just-in-Time-Compiler checkt Byte-Code und generiert Maschinen-Code

Adressraumtrennung

Segmentierung oder Eingrenzung von Programmen:

- Prozesse können die durch ihren logischen Adressraum jew. definierte Schutzdomäne nicht oder nur kontrolliert verlassen
- Abwesenheit von Prozessor- und Speicherfehlern vorausgesetzt
  - je nach Abstraktionsebene aber mit unterschiedlichem Wirkungsfeld

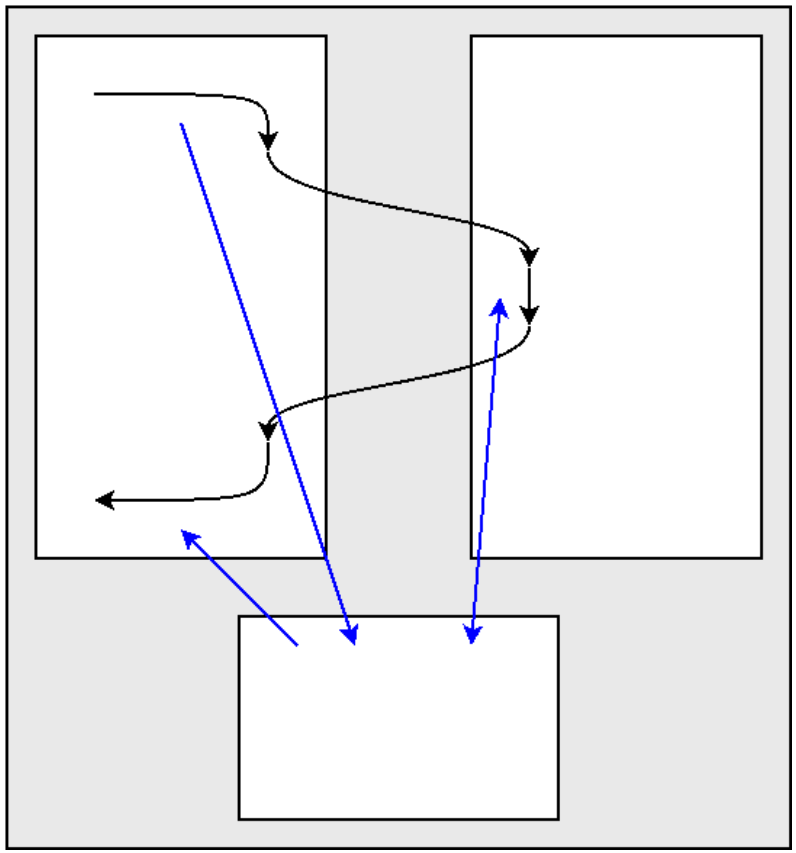
Adressraumzugriff

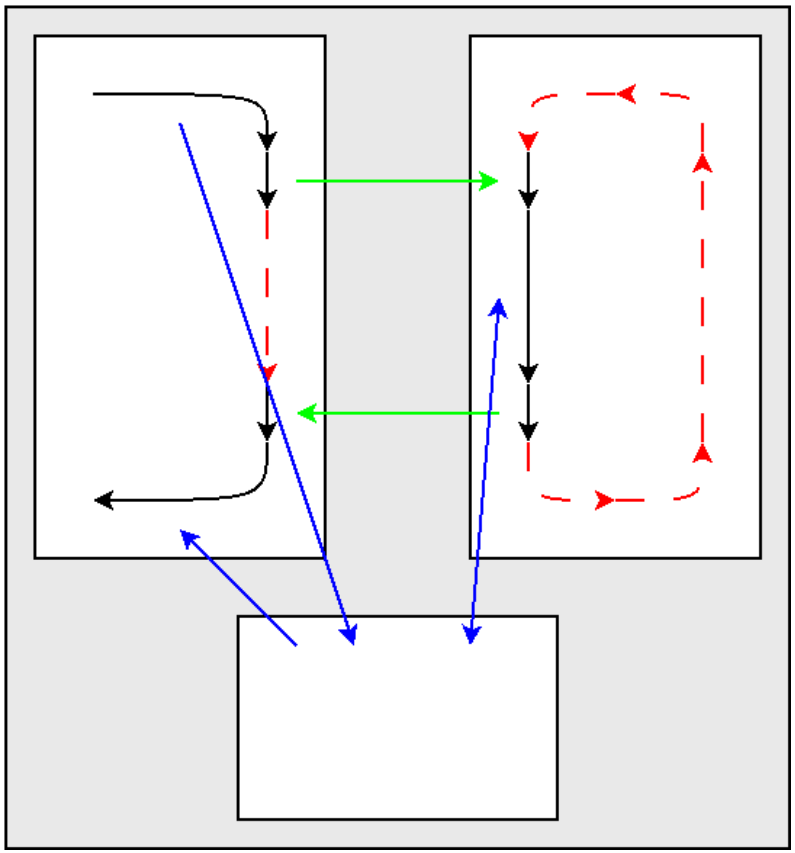
Grenzen überschreitende Operationen als Folge der Trennung

- durch Wechsel der Schutzdomäne
  - prozedurbasierte Technik
    - Systemaufruf, leichtgewichtiger Fernaufruf
    - Kontrollflussfortsetzung im anderen Adressraum
  - koroutinenbasierte/Thread-basierte Technik
    - Nachrichtenversenden, Fernaufruf
    - Kontrollflusswechsel hin zum anderen Adressraum
- durch Mitbenutzung (*sharing*) von Adressraumbereichen
  - Datenverbund (*data sharing*)
    - mit gleichförmigen oder ungleichförmigen Lese-/Schreibrechten
  - Gemeinschaftsbibliothek (*shared library*)
- durch Kombinierung beider Ansätze
  - Einrichtung eines Datenverbunds beim Wechsel der Schutzdomäne
    - aus dem „eingewechselten Adressraum“ heraus veranlasst
    - zum Lesen/Schreiben von Entitäten des „ausgewechselten Adressraums“

Adressraumzugriff

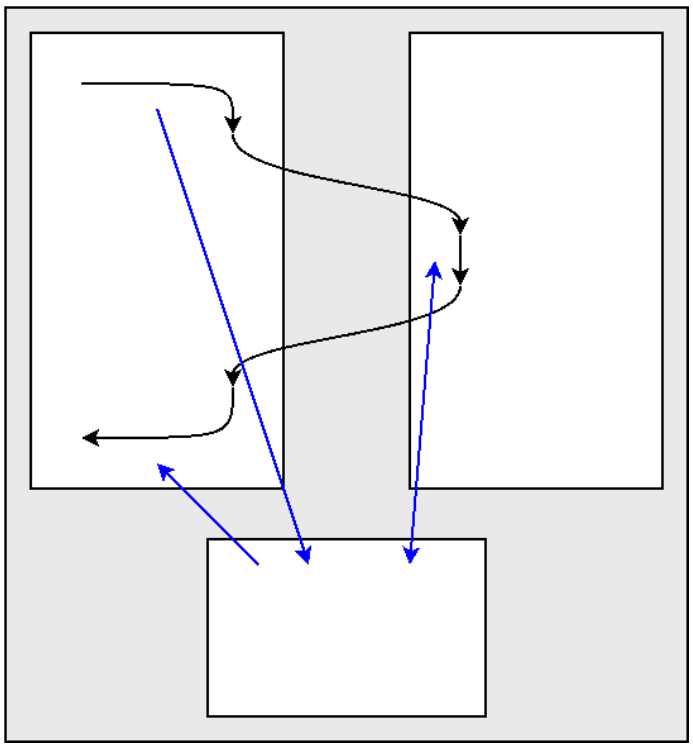
Grenzen überschreitende Operationen als Folge der Trennung





Adressraumzugriff

Grenzen überschreitende Operationen als Folge der Trennung



Vorteile:

- keine unnötigen Threads/Kontextwechsel

Nachteile:

- ggf. Verlust von Cache-Inhalten
- Kontextwechsel über BS

Adressraumzugriff

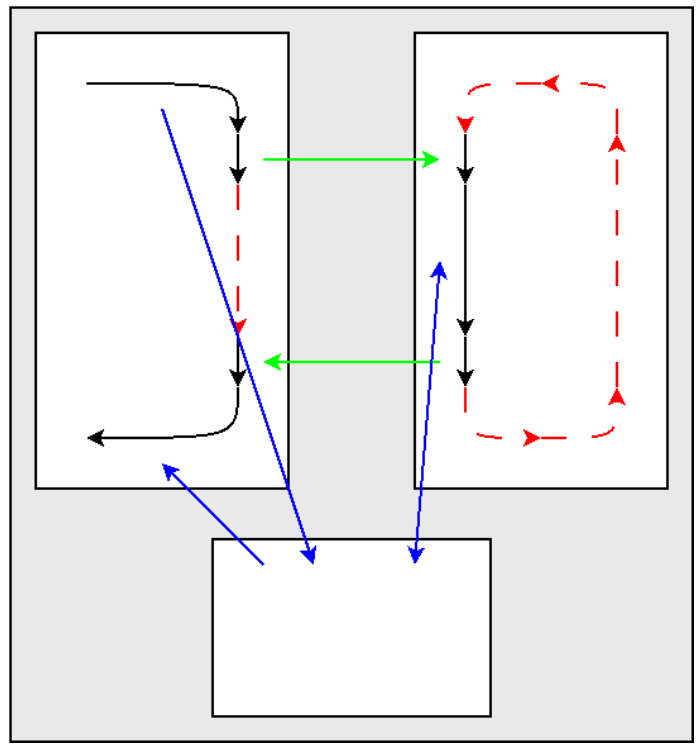
Grenzen überschreitende Operationen als Folge der Trennung

Vorteile:

- Cache-Inhalte bleiben erhalten

Nachteile:

- mehr Threads/Kontextwechsel
- `send`/`recv` über BS



Adressraumschutz

- hardwarebasiert, segment- oder seitenoriertiert
  - MMU/MPU vergleicht Zugriffsart und Zugriffsrecht
    - Lesen, Schreiben, Ausführen – auch in Kombination
  - CPU begeht Ausnahme von normaler Programmausführung
    - lässt den aktuellen Maschinenbefehl in die Falle (*trap, exception*) laufen
    - bewirkt damit eine synchrone Programmunterbrechung
  - Betriebssystem führt Ausnahmebehandlung [2] durch
    - Wiederaufnahmemodell: Fortsetzung des unterbrochenen Prozesses
    - Beendigungsmodell: Abbruch des unterbrochenen Prozesses
- softwarebasiert, datentyporientiert ⇒ sprachbasiert
  - Laufzeitsystem – d. h., der Prozess selbst – führt o. g. Funktionen durch
  - bestimmte Überprüfungen nimmt jedoch bereits der (JIT-) Compiler vor
    - alle statisch, also *vor* Laufzeit, entscheidbaren Zugriffsoperationen
- in Synergie beider Ansätze: Befähigung (*capability*, [1])
  - befähigungsbasierte Systeme sind kompliziert – obwohl ideal zum Schutz

Lernziele

Vorlesung

- *Wissen* zu Adressraumkonzepten von Betriebssystemen vertiefen
- *Verstehen* über (logische) Adressräume festigen
  - inhaltliches Begreifen verschiedener Facetten von Adressräumen
  - intellektuelle Erfassung des Zusammenhangs, in dem Adressräume stehen

Übung $\rightsquigarrow$ mikrokern-ähnliches Betriebssystem

- *Anwenden* ausgewählter Vorlesungsinhalte für StuBS
- *Analyse* der Anforderungen an und Gegebenheiten von StuBS
- *Synthese* von Adressraumabstraktionen und StuBS
- *Evaluation* des erweiterten StuBS$_{ml}$: Vorher-nachher-Vergleich

Überblick I

- Einführung: vertikale/horizontale (räumliche) Isolation ÜV
- Einflussfaktoren
  - Systemaufrufe: Befehlsformate der Machinenprogrammebene ÜV
  - Betriebssystemarchitektur: {Nano,Mikro,Makro,Exo}kern V
  - Hierarchien: Schichtenstruktur von Betriebssystemen V
- Adressraumkonzepte
  - Seitenadressierung: ein-/mehrstufig, invertiert, spärlich ÜV
  - Segmentadressierung: pur, seitenbasierte Hybride V

... jeweils mit Beispielen aus der Praxis.

Überblick II

- Sprachbasierung: Systemprogrammiersprachen S
- Adressraummodelle
  - Mehradressraumsystem: total/partiell privat ÜV
  - Einadressraumsystem: Randomisierung, Befähigungen V
- Spezialfälle
  - adaptiver Hauptspeicherschutz: TLB, typsichere Programme ÜV
  - virtuell gemeinsamer Speicher: seitenbasierte „IPC“ ÜV
  - virtuell nicht-flüchtiger Hauptspeicher: NVRAM, Transparenz V
  - dynamisches Binden: Gemeinschaftsbibliotheken V
- Nachlese, Ausblick V

... jeweils mit Beispielen aus der Praxis.

Gliederung

Anforderungen

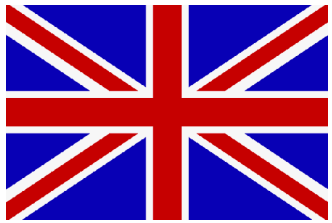
- Voraussetzung

Softwaresysteme	Programmiersysteme	Hardwaresysteme
SP, SPiC	C, C++, `make`	x86/x86_64
BS $\Leftrightarrow$ StuBS	ASM	Mehrkerner

- Erfahrung
  - in der hardwarenahen Programmierung
    - Gerätetreiber, Unterbrechungsbehandlung, Prozesswechsel
  - in der Fehlersuche/-beseitigung (*debugging*) in Betriebssystemen
    - nichtsequentielle Programme, mehrkernige Prozessoren
  - in der projektorientierten Entwicklung nativer Systemprogramme
- Erwartung
  - intrinsische Motivation, kritisches Denken, positive Fehlerkultur

Unterrichtstermine und -sprache

- Vorlesungs-, Übungs- und Rechnerzeiten:
  - auf `sys.cs.fau.de` dem Reiter „Lehre“ folgen
- Unterrichtssprache:



  - Vorlesung und Übung
  - Fachbegriffe
- informatische Fachsprache
  - Sachwortverzeichnis (in Arbeit und Überarbeitung)
    - `https://www4.cs.fau.de/DE/~wosch/glossar.pdf`

Übungsbetrieb

- Tafelübung $\rightsquigarrow$ „*learning by exploring*“
  - Anmeldung über WAFFEL[1] (URL siehe Leitseite von BST)
  - Übungsaufgaben sind (bevorzugt) in Gruppen zu bearbeiten
- Rechnerarbeit $\rightsquigarrow$ „*learning by doing*“, kein Tafelersatz
  - Anmeldung ist nicht vorgesehen, reservierte Arbeitsplätze s.o.
  - bei Fragen zu den Übungsaufgaben, Übungsleiter konsultieren
    - Email senden bzw. einfach vorbeischauen...

Der, die, das.
Wer, wie, was?
Wieso, weshalb, warum?
Wer nicht fragt, bleibt dumm!

[1] Abk. für Webanmeldefrickelformular Enterprise Logic

Prüfungsrelevante Studienleistung

5 ECTS

- BST und OOStuBS$_{ml}$
- 4 SWS (2 V + 2 Ü)

7,5 ECTS

- BST und MPStuBS$_{ml}$
- 6 SWS (2 V + 2 Ü + 2 EÜ)
  - erweiterte Übung
  - ggf. auch Extraaufgabe

- Prüfungsgespräch
  - 30 Minuten
  - Stoff zu V + Ü

- Prüfungsgespräch
  - 30 Minuten
  - Stoff zu V + Ü + EÜ

- erfolgreiche Bearbeitung der Übungsaufgaben ist Voraussetzung
- Anmeldung zum Prüfungsgespräch per *E-Mail* an:

`sieh@cs.fau.de`

  - angeben ob 5 oder 7,5 ECTS
  - Termin oder Terminfenster mitsenden
    - Prüfungszeitraum (Ausnahmen bestätigen die Regel)

Gliederung

Kontakt

- Volkmar Sieh, Dr.-Ing.
  - Vorlesung
  - `sys.cs.fau.de/person/sieh`

- Phillip Raffeck, M. Sc.
  - Übungen
  - `sys.cs.fau.de/person/raffeck`

- Dustin Nguyen, M. Sc.
  - Übungen
  - `sys.cs.fau.de/person/nguyen`

- Maximilian Ott, M. Sc.
  - Übungen
  - `sys.cs.fau.de/person/ott`

- Thomas Kob
  - Übungen

Literaturverzeichnis

[1] 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

[2] Goodenough, J. B.:
Exception Handling: Issues and a Proposed Notation.
In: *Communications of the ACM* 18 (1975), Nr. 12, S. 683–696

[3] Schröder-Preikschat, W. :
Echtzeitsysteme.
http://www4.informatik.uni-erlangen.de/Lehre/WS05/V_EZS, 2005 *ff.*

[4] Schröder-Preikschat, W. ; Kleinöder, J. :
Systemprogrammierung.
http://www4.informatik.uni-erlangen.de/Lehre/WS08/V_SP, 2008 *ff.*