Betriebssystembau (BSB)

VL 14 – Zusammenfassung und Ausblick

Alexander Lochmann

Lehrstuhl für Informatik 12 – Arbeitsgruppe Systemsoftware
Technische Universität Dortmund

`https://sys.cs.tu-dortmund.de/de/lehre/ws23/bsb`

WS 23 – 29. Januar 2024

technische universität dortmund

arbeitsgruppe systemsoftware

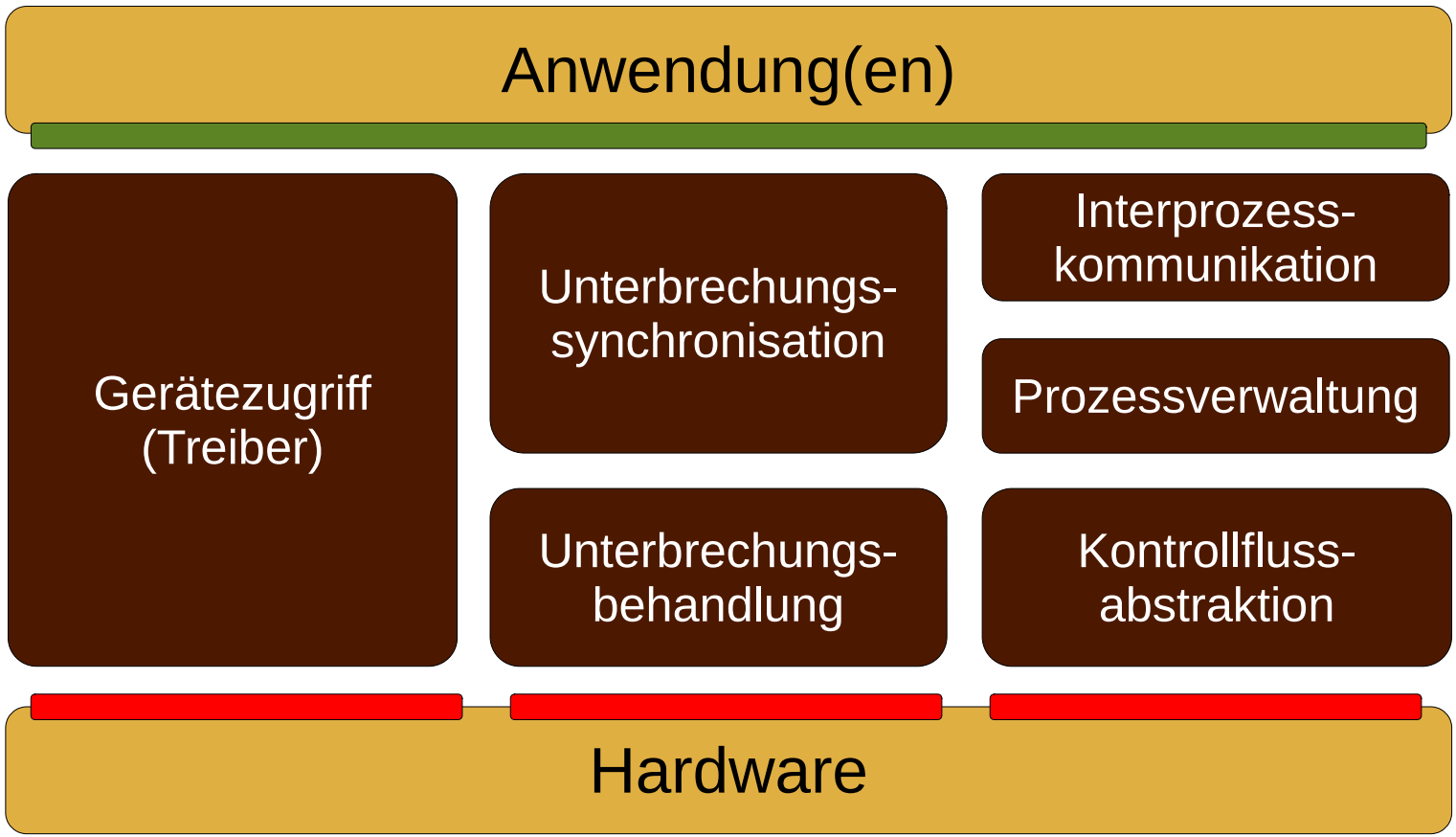
Agenda

Lernziele

⇝VL 1

- **Vertiefen** des Wissens über die interne Funktionsweise von Betriebssystemen
  - Ausgangspunkt: Systemprogrammierung
  - Schwerpunkt: Nebenläufigkeit und Synchronisation
- **Entwickeln** eines Betriebssystems *von der Pike auf*
  - OOStuBS / MPStuBS Lehrbetriebssysteme
  - Praktische Erfahrungen im Betriebsystembau machen
- **Verstehen** der technologischen Hardware-Grundlagen
  - PC-Technologie verstehen und einschätzen können
  - Schwerpunkt: Intel x86_64

Überblick Vorlesungen



Was wir gemacht haben

Drei inhaltliche Schwerpunkte!

- VL_1 ***Einführung***
- VL_2 ***BS-Entwicklung***
- VL_3 ***IRQs (Hardware)***
- VL_4 ***IRQs (Software)***
- VL_5 ***IRQs (Synchronisation)***
- VL_6 ***IRQs (SoftIRQ)***
- VL_7 ***Intel IA-32***
- VL_8 ***Koroutinen und Fäden***
- VL_9 ***Scheduling***
- VL_{10} ***Architekturen***
- VL_{11} ***Fadensynchronisation***
- VL_{12} ***Gerätetreiber***
- VL_{13} ***IPC***

Was wir gemacht haben

Drei inhaltliche Schwerpunkte!

1. Ein Streifzug durch die PC-Architektur

VL_1	***Einführung***
VL_2	***BS-Entwicklung***
VL_3	***IRQs (Hardware)***
VL_4	***IRQs (Software)***
VL_5	***IRQs (Synchronisation)***
VL_6	***IRQs (SoftIRQ)***
VL_7	***Intel IA-32***
VL_8	***Koroutinen und Fäden***
VL_9	***Scheduling***
VL_{10}	***Architekturen***
VL_{11}	***Fadensynchronisation***
VL_{12}	***Gerätetreiber***
VL_{13}	***IPC***

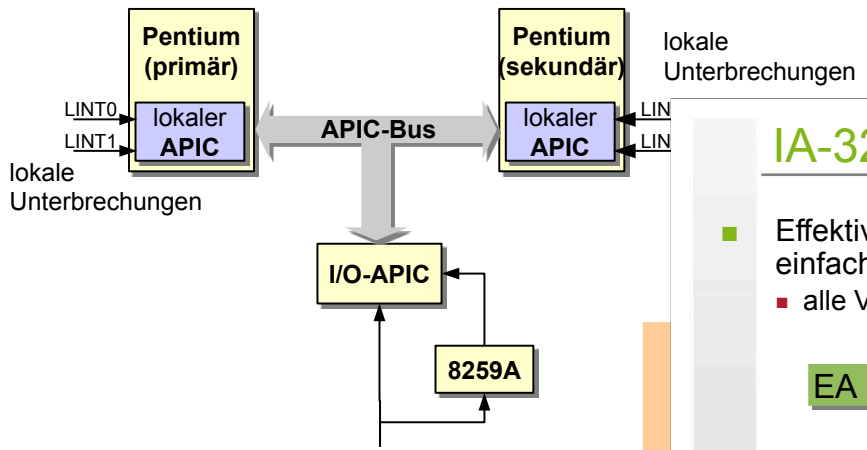
Was wir gemacht haben

Drei inhaltliche Schwerpunkte!

1. Ein Streifzug durch die PC-Architektur

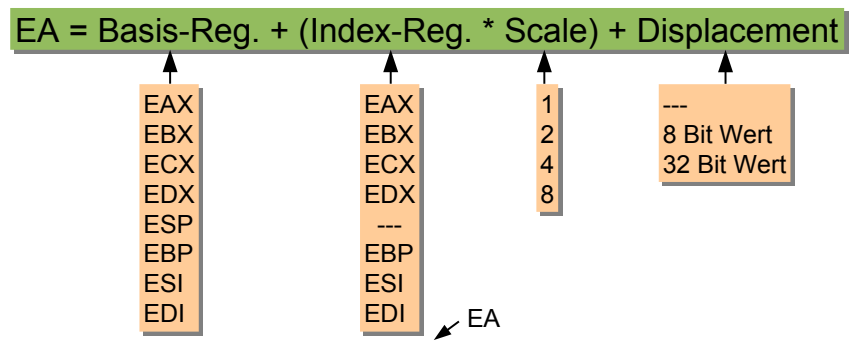
Die APIC Architektur

- ein APIC *Interrupt*-System besteht aus lokalen APICs auf jeder CPU und einem I/O APIC



IA-32: Adressierungsarten

- Effektive Adressen (EA) werden nach einem einfachen Schema gebildet
  - alle Vielzweckregister können dabei gleichwertig verwendet werden



- Beispiel: MOV EAX, **Feld[ESI * 4]**
  - Lesen aus Feld mit 4 Byte großen Elementen und ESI als Index

Was wir gemacht haben

Drei inhaltliche Schwerpunkte!

2. Kontrollflüsse und ihre Interaktionen

- VL_1 ***Einführung***
- VL_2 ***BS-Entwicklung***
- **VL_3** ***IRQs (Hardware)***
- **VL_4** ***IRQs (Software)***
- **VL_5** ***IRQs (Synchronisation)***
- **VL_6** ***IRQs (SoftIRQ)***
- VL_7 ***Intel IA-32***
- **VL_8** ***Koroutinen und Fäden***
- **VL_9** ***Scheduling***
- VL_{10} ***Architekturen***
- **VL_{11}** ***Fadensynchronisation***
- VL_{12} ***Gerätetreiber***
- **VL_{13}** ***IPC***

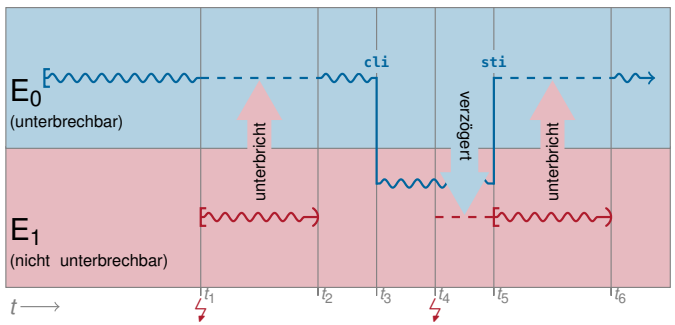
Was wir gemacht haben

Drei inhaltliche Schwerpunkte!

2. Kontrollflüsse und ihre Interaktionen

Prioritätsebenenmodell

- Kontrollflüsse können die Ebene wechseln
  - Mit `cli` wechselt ein E_0-Kontrollfluss explizit auf E_1
    - er ist ab dann nicht mehr unterbrechbar
    - andere E_1-Kontrollflüsse werden verzögert (↩ Sequentialisierung)
  - Mit `sti` wechselt ein E_1-Kontrollfluss explizit auf E_0
    - er ist ab dann (wieder) unterbrechbar
    - anhängige E_1-Kontrollflüsse „schlagen durch“ (↩



Erweitertes Prioritätsebenenmodell

- Kontrollflüsse auf E_l werden
  1. jederzeit unterbrochen durch Kontrollflüsse von E_m (für $m > l$)
  2. nie unterbrochen durch Kontrollflüsse von E_k (für $k \leq l$)
  3. jederzeit verdrängt durch Kontrollflüsse von E_l (für $l = 0$)

E_0 (unterbrechbar, verdrängbar)	$\mapsto$ Fadenebene
$E_{1/2}$ (unterbrechbar, nicht verdrängbar)	$\mapsto$ Epilogebene
E_1 (nicht unterbrechbar, nicht verdrängbar)	$\mapsto$ Unterbrechungsebene

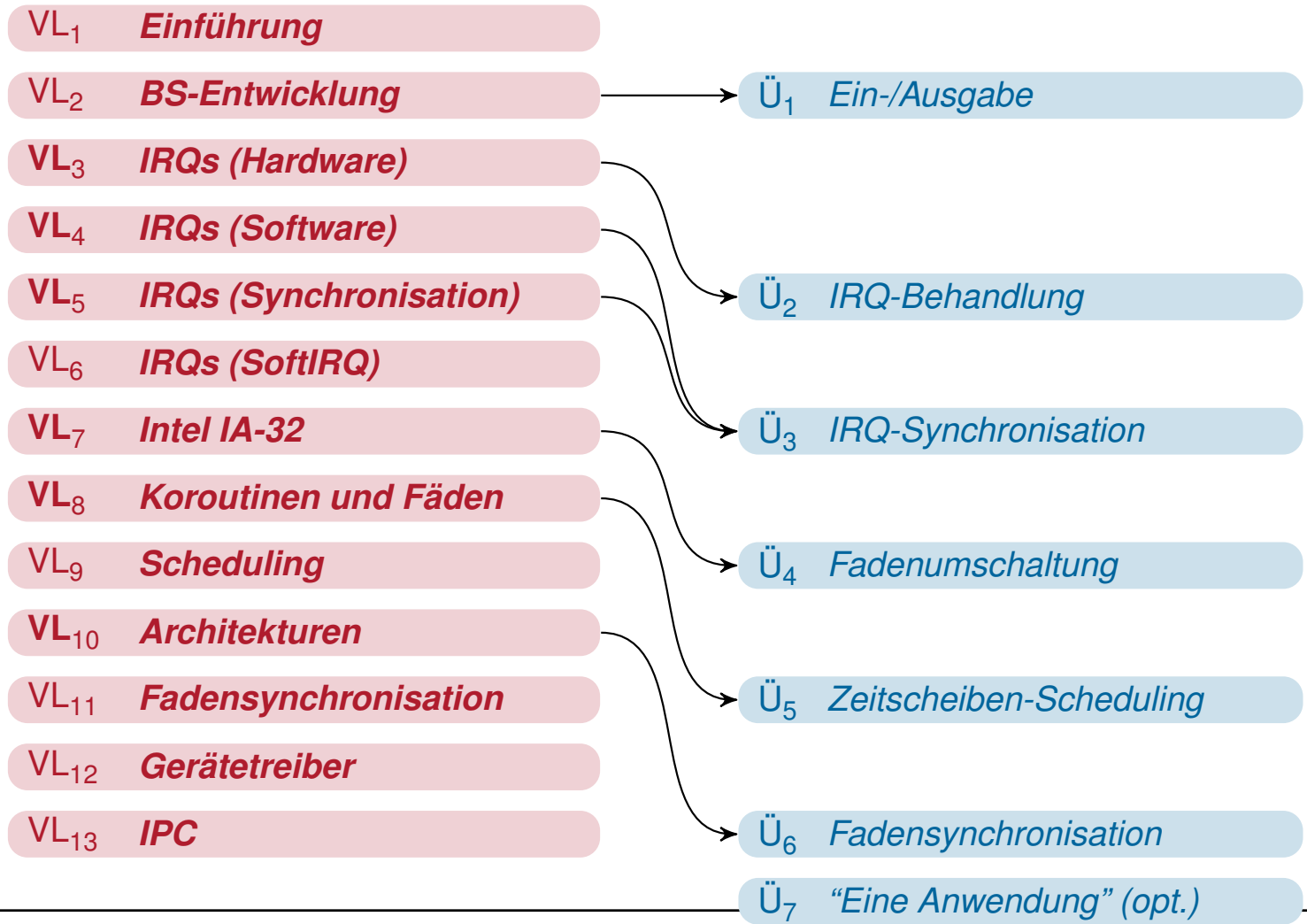
Kontrollflüsse der E_0 (Fadenebene) sind **verdrängbar**.

Für die Konsistenzssicherung auf dieser Ebene brauchen wir zusätzliche **Mechanismen** zur **Fadensynchronisation**.

Was wir gemacht haben

Drei inhaltliche Schwerpunkte!

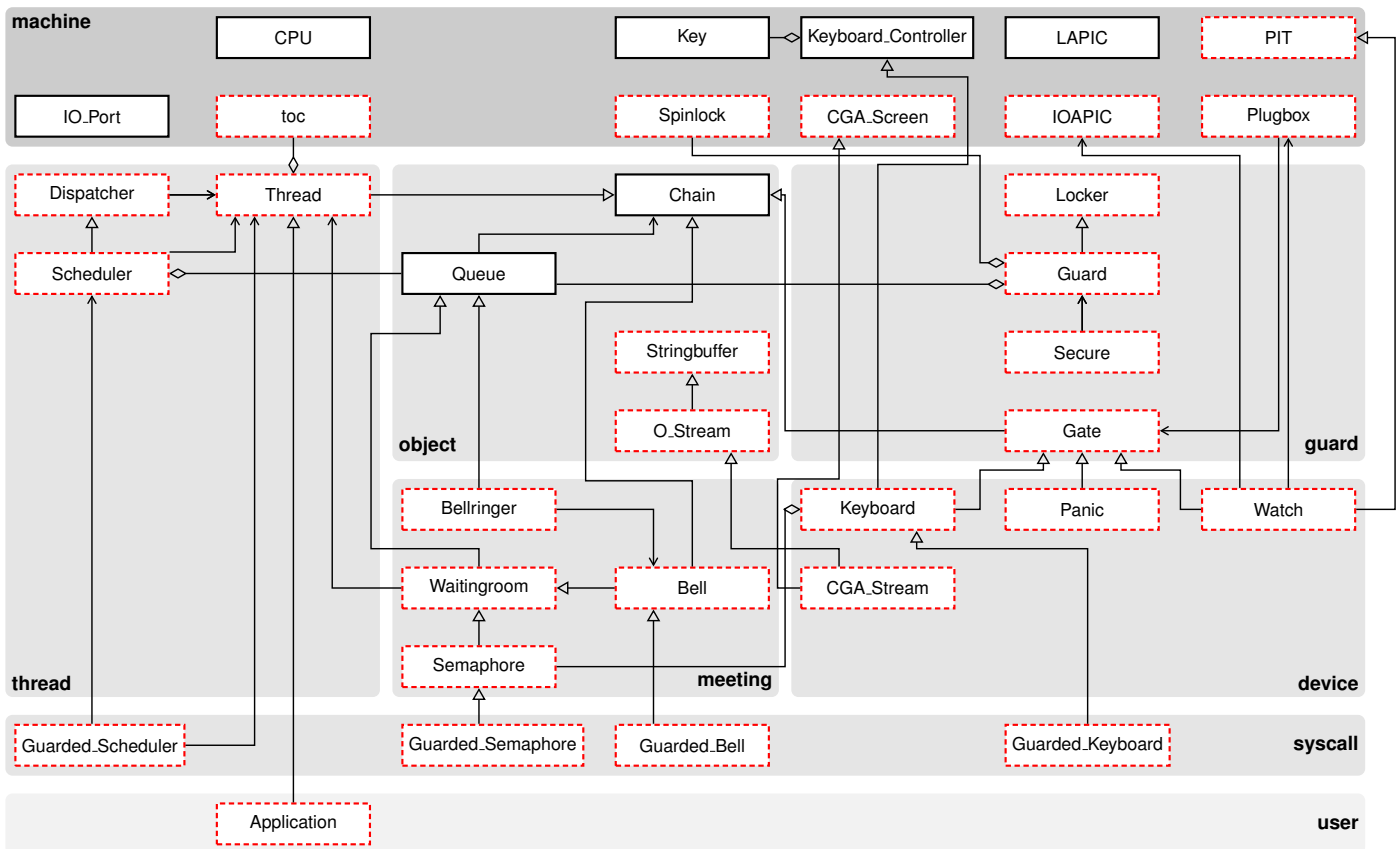
2. Kontrollflüsse und ihre Interaktionen



Was wir gemacht haben

Drei inhaltliche Schwerpunkte!

2. Kontrollflüsse und ihre Interaktionen



Was wir gemacht haben

Drei inhaltliche Schwerpunkte!

3. BS-Konzept allgemein und am Beispiel (Windows/Linux)

- VL_1 ***Einführung***
- **VL_2** ***BS-Entwicklung***
- VL_3 ***IRQs (Hardware)***
- VL_4 ***IRQs (Software)***
- VL_5 ***IRQs (Synchronisation)***
- VL_6 ***IRQs (SoftIRQ)***
- VL_7 ***Intel IA-32***
- **VL_8** ***Koroutinen und Fäden***
- **VL_9** ***Scheduling***
- **VL_{10}** ***Architekturen***
- **VL_{11}** ***Fadensynchronisation***
- **VL_{12}** ***Gerätetreiber***
- **VL_{13}** ***IPC***

Was wir gemacht haben

Drei inhaltliche Schwerpunkte!

3. BS-Konzept allgemein und am Beispiel (Windows/Linux)

Completely Fair Scheduler (CFS)

- **Ansatz:** Ablaufbereite Tasks bekommen die Rechenzeit gleichmäßig ("fair") zugeteilt
  - bei *n* Tasks jeweils 1/*n*-tel der CPU-Leistung
  - hierarchische Zuteilung durch *scheduling groups*
- CFS läuft nur bei **SCHED_NORMAL**
  - Echtzeittask (SCHED_RR und SCHED_FIFO) wie bi
  - ansonsten: Task mit *geringster* CPU-Zeit hat höchste
- Planungskriterium ist die bislang zugeteilte CPU-Z
  - Ready-Liste als Rot-Schwarz-Baum, sortiert nach de
  - Komplexität O(log *N*)
    (in der Praxis trotzdem effizienter als alter O(1)-Sche
  - Prioritäten (im Sinne von nice) werden durch "schnellere/langsamere" Uhren abgebildet

al Betriebssystembau (VL 9 | WS 23) 9 Fadenverwaltung – Ablaufplanung

Windows – E/A System

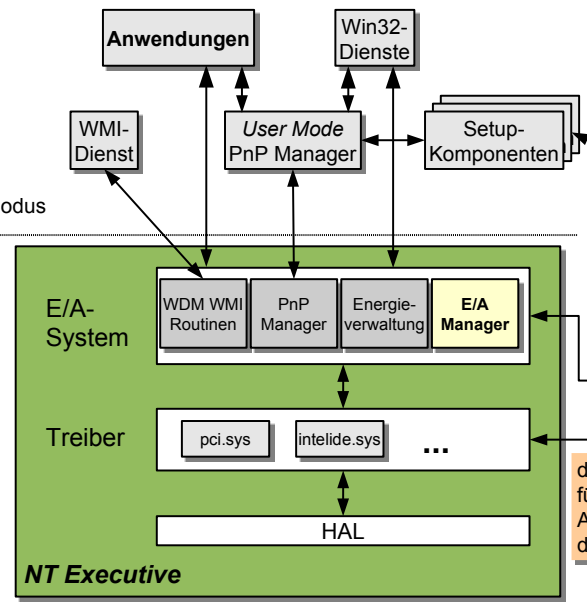
WMI (ab Win2K) dient der Ereignis- und Leistungüber-wachung

der **PnP Manager** erkennt neue Geräte und fragt ggf. mit Hilfe des User-Mode Teils nach einem Treiber.

HAL ist die Hardware-Abstraktions-schicht

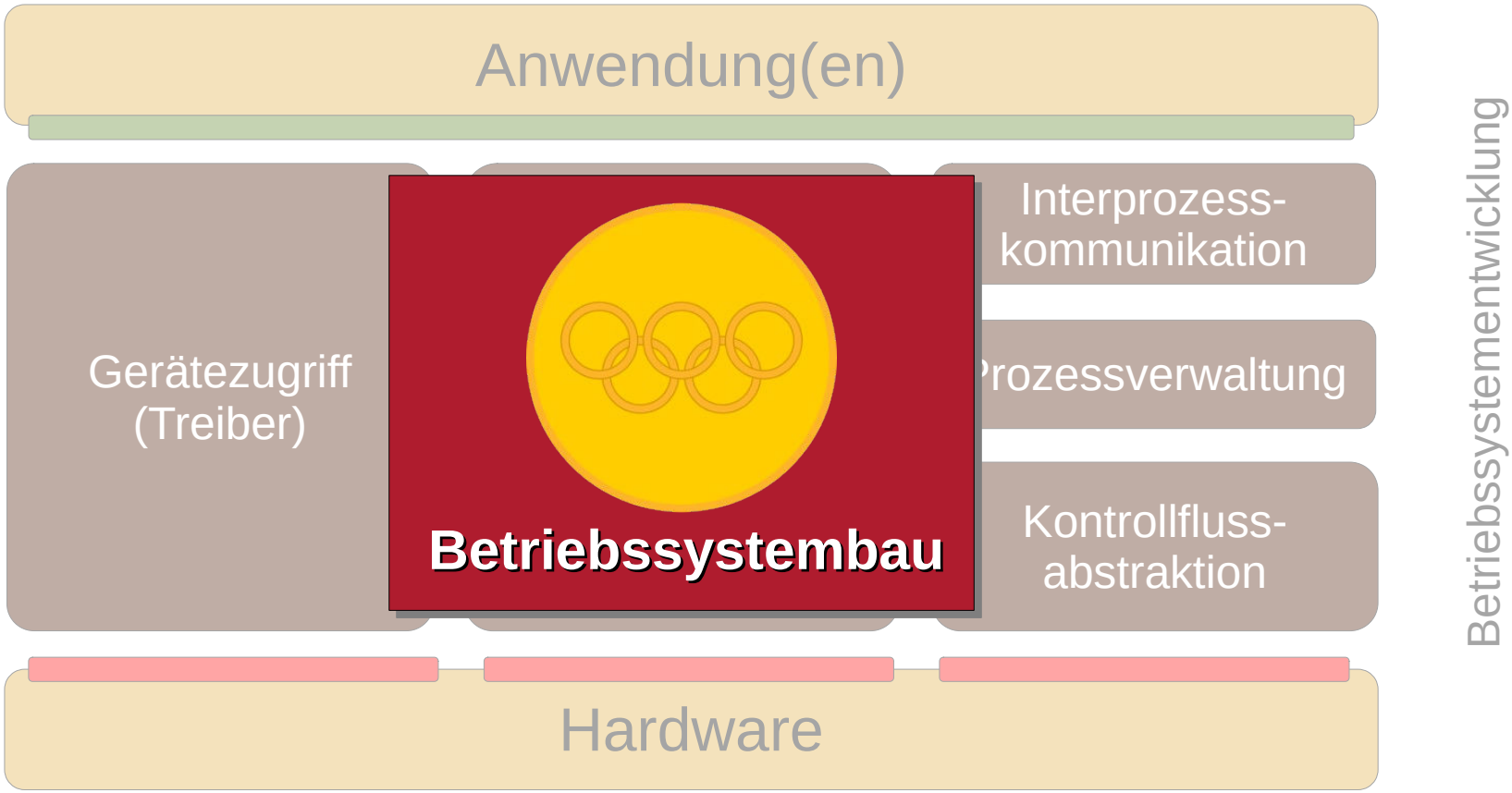
.inf und **.cat** Dateien kommen mit dem Treiber

der **E/A Manager** führt die Ein- und Ausgaben mit Hilfe der Treiber durch



al Betriebssystembau (VL 12 | WS 23) 12 Treiber – Struktur des E/A-Systems 12 – 29

Zusammen eine ganze Menge!



Realitätscheck: MPStuBS ⟷ „richtiges BS“

Es fehlt noch eine ganze Menge!

- Adressraumverwaltung und Prozesskonzept ⇝ [BST]
- Dateisystem und Programmlader
- Netzwerk und TCP/IP
- . . .

Realitätscheck: MPStuBS ⟷ „richtiges BS“

Es fehlt noch eine ganze Menge!

- Adressraumverwaltung und Prozesskonzept ⇝ [BST]
- Dateisystem und Programmlader
- Netzwerk und TCP/IP
- . . .

Beispiel Linux [10]

Aug 91	Linux 0.01:	bash, Dateisystem
Jan 92	Linux 0.12:	Virtueller Speicher (Paging)
Mär 92	Linux 0.95:	X-Windows, Unix Domain Sockets (jetzt fehlte nur noch Netzwerk!)
Mär 94	Linux 1.00:	**Netzwerk und TCP/IP**

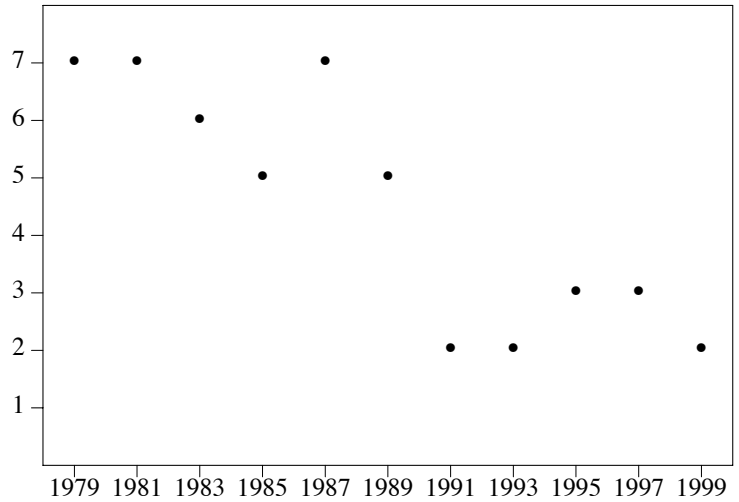
Agenda

Betriebssysteme ↦ ausgeforscht?

„Systems Software Research is Irrelevant" [6]

Urgestein Robert Pike (2000), einer der Entwickler von UNIX, Inferno [5], Plan 9 [7] und UTF-8
(zur Zeit bei Google beschäftigt):

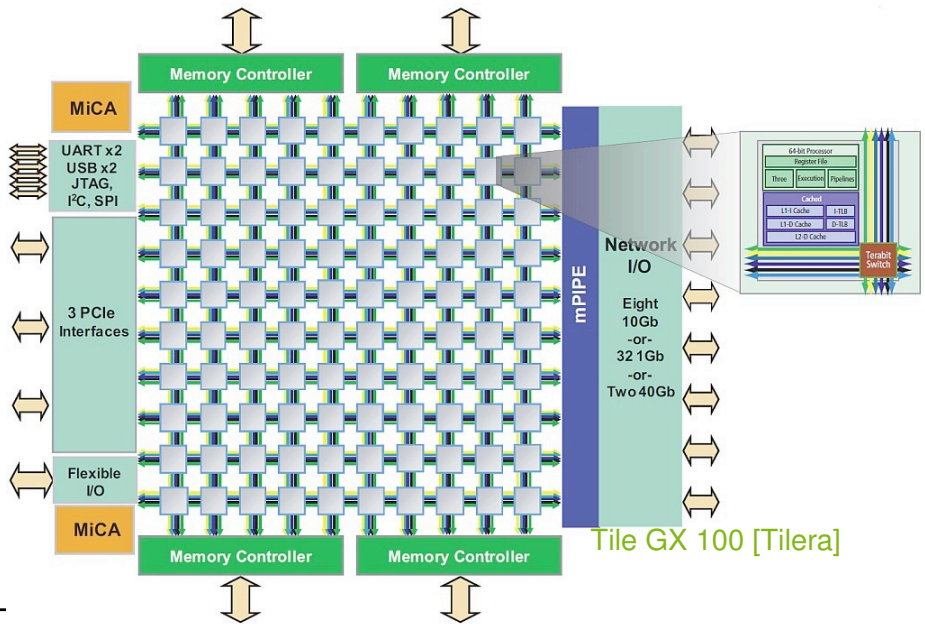
- Where is the innovation? ⇝ Microsoft, mostly
- Every other „new" OS ends up being UNIX
- Linux? ⇝ Just another copy of the same old stuff
- . . .



New Operating Systems at SOSP [6]

Aber dann. . .

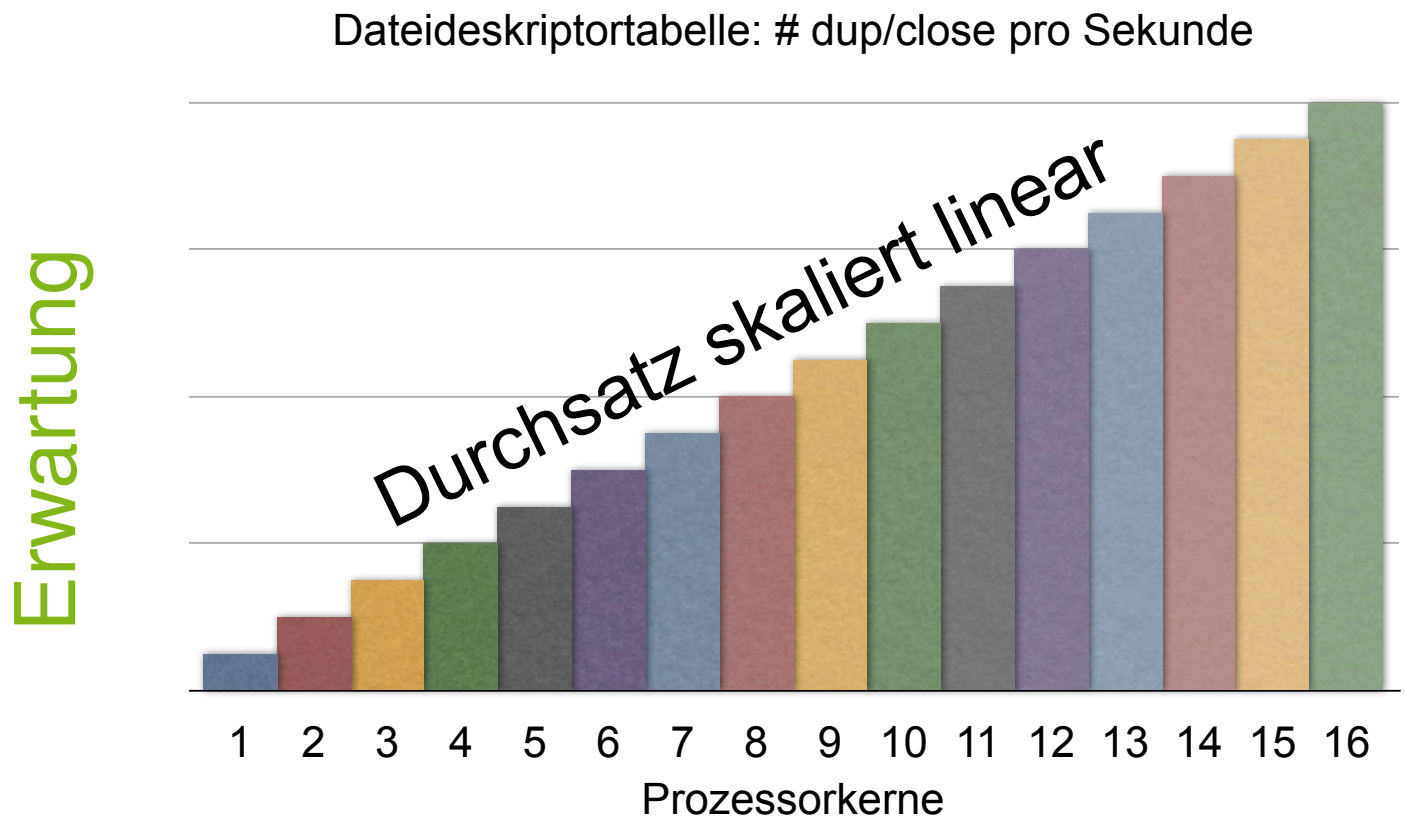
The Multicore Challenge!



Tile GX 100 [Tilera]

Fallstudie: Dateideskriptortabelle in Linux

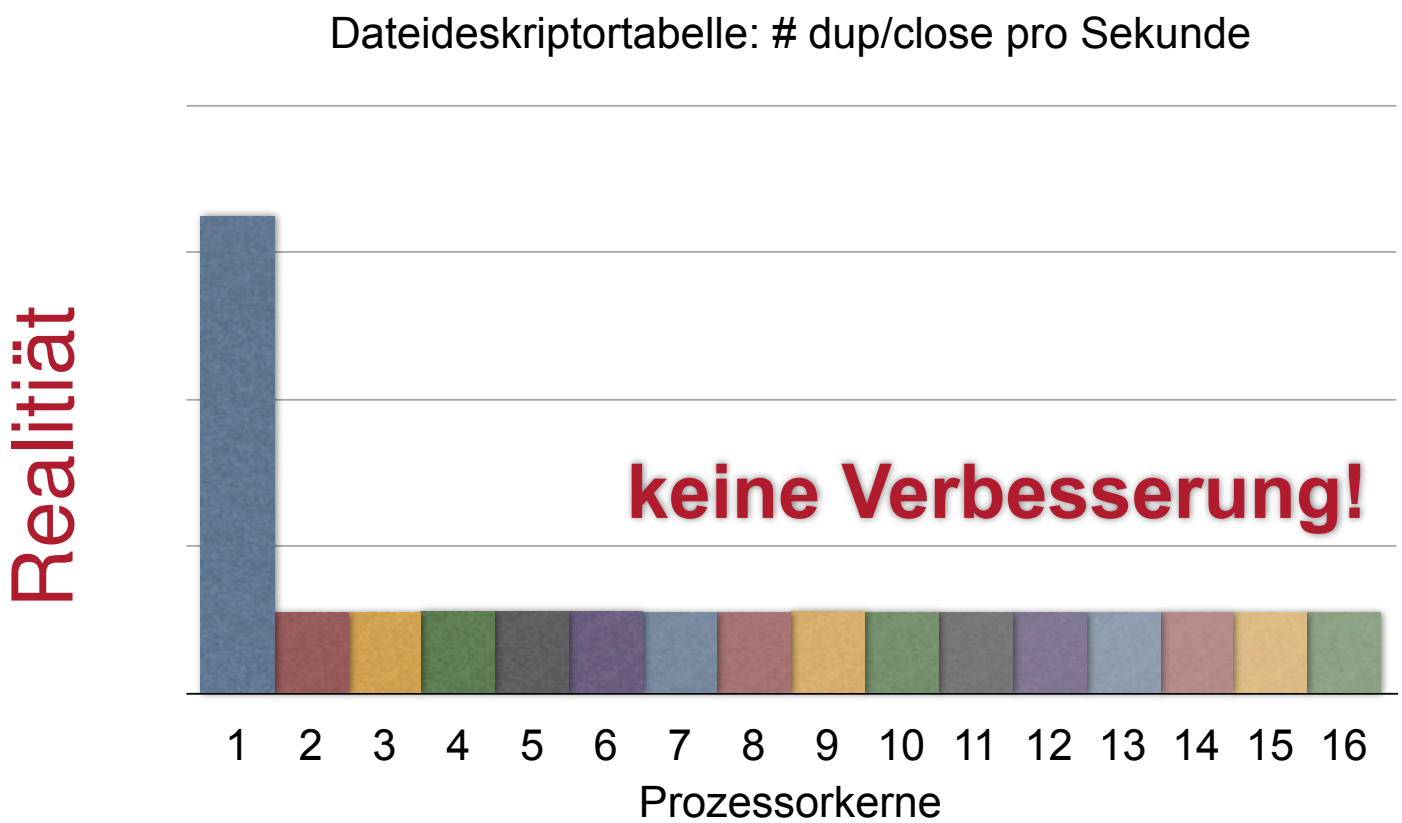
- Boyd-Wickizer u. a. (OSDI 2008) [2]
  - Linux 2.6.25 auf 16-Kern AMD Opteron, 1–16 Kerne in Gebrauch
  - Pro Kern ein Faden, der Dateideskriptoren anfordert und freigibt:
    `int f = open(...); while(1){ close( dup( f ) ); }`



Fallstudie: Dateideskriptortabelle in Linux

- Boyd-Wickizer u. a. (OSDI 2008) [2]
  - Linux 2.6.25 auf 16-Kern AMD Opteron, 1–16 Kerne in Gebrauch
  - Pro Kern ein Faden, der Dateideskriptoren anfordert und freigibt:

```
int f = open(...); while(1){ close( dup( f ) ); }
```

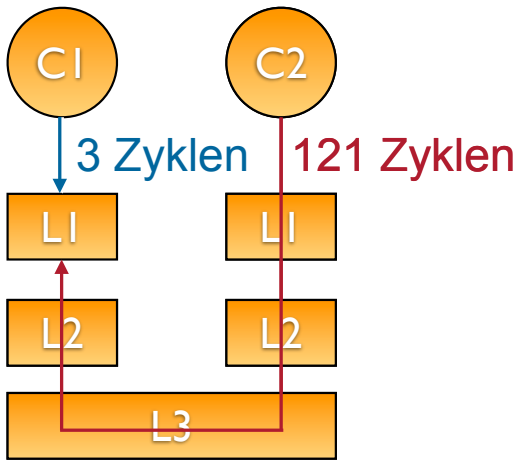


Fallstudie: Dateideskriptortabelle in Linux

- Boyd-Wickizer u. a. (OSDI 2008) [2]
  - Linux 2.6.25 auf 16-Kern AMD Opteron, 1–16 Kerne in Gebrauch
  - Pro Kern ein Faden, der Dateideskriptoren anfordert und freigibt:
    `int f = open(...); while(1){ close( dup( f ) ); }`
- Ergebnis: Schon ab **2 Kernen sinkt** der Gesamtdurchsatz
  1. Grobgranulares *Locking* ⇝ *false sharing* ⇝ keine Skalierbarkeit
  2. Geteilte Datenstruktur ⇝ *cache trashing* ⇝ Durchsatzabfall

```
fd_alloc () {
  lock(fd_table);
  fd = get_free_fd();
  set_fd_used(fd);
  fix_smallest_fd();
  unlock(fd_table);
}
```

1. false sharing



2. cache trashing

Fallstudie: Dateideskriptortabelle in Linux

- Boyd-Wickizer u. a. (OSDI 2008) [2]
  - Linux 2.6.25 auf 16-Kern AMD Opteron, 1–16 Kerne in Gebrauch
  - Pro Kern ein Faden, der Dateideskriptoren anfordert und freigibt:
    `int f = open(...); while(1){ close( dup( f ) ); }`
- Ergebnis: Schon ab **2 Kernen sinkt** der Gesamtdurchsatz
  1. Grobgranulares *Locking* ⇝ *false sharing* ⇝ keine Skalierbarkeit
  2. Geteilte Datenstruktur ⇝ *cache trashing* ⇝ Durchsatzabfall

Multicore: POSIX (↦ UNIX) considered harmful!

*„This problem is not specific to Linux, but is **due to POSIX semantics**, which require that a new file descriptor be visible to all of a process's threads even if only one thread uses it."* [2]

Folgerung: Wir brauchen neue Entwurfsansätze!

- Corey — MIT, OSDI 2008, Exokern-artig: [2]
  - *Sharing* unter die Kontrolle der Applikation stellen
  - Datenstrukturen (im Normalfall) nur von einem Kern aus bearbeiten
  - Anwendungen müssen angepasst werden
- Barrelfish — ETH/MSR, SOSP 2009, Mikrokern-artig: [1]
  - BS als verteiltes System von Kernen verstehen und organisieren
  - kein implizites *Sharing*, Kommunikation nur über Nachrichten
- Factored OS (fos) — MIT, 2009, Mikrokern-artig: [11]
  - BS für 100 bis 1000 Kerne $\leadsto$ *time sharing* wird zu *space sharing*
  - Letztlich ähnlicher Ansatz wie Barrelfish
- TxOS — UT, SOSP 2009, Monolith (Linux): [8]
  - Konkurrenz zulassen durch *transactional syscalls* (statt *Locks*)
  - Anwendungen müssen angepasst werden

. . . oder doch nicht?

- Boyd-Wickizer u. a. (OSDI 2010) [3]
  - „An Analysis of Linux Scalability to Many Cores“
  - Skalierbarkeit von Linux 2.6.35-rc5 auf 48-Kern AMD Opteron
- Ansatz: *run* – *analyze* – *fix*
  - *run:* sieben „systemintensive” Anwendungen
    - Exim, memcached, Apache, PostgreSQL, gmake, Psearchy, MapReduce
  - *analyze:* gezielte Identifizierung von Flaschenhälsen
    - im Linux-Kern selber (16)
    - im Entwurf der Anwendung
    - durch die ungeschickte Verwendung der Systemschnittstelle
  - *fix:* Verbesserung, überwiegend durch Standardtechniken der parallelen Programmierung (⇝ [PFP])

. . . oder doch nicht?

- Clements u. a. (SOSP 2013) [4]
  - „The Scalable Commutativity Rule: Designing Scalable Software for Multicore Processors“
  - Skalierbarkeit von *Schnittstellen* theoretisch und praktisch untersucht anhand Kommutativität der (möglichen) Implementierung.

- Idee: Wenn Operationen kommutativ sind, können sie (im Prinzip) auch skalierbar implementiert werden.

. . . oder doch nicht?

Ergebnis: Alles nicht so schlimm. . .

„We find that we can remove most kernel bottlenecks that the applications stress by modifying the applications or kernel slightly.
[. . .] the results suggest that ***traditional kernel designs may be compatible with achieving scalability*** *on multicore computers.”* [3]

„Finally, using sv6, we showed that it ***is practical to achieve a broadly scalable implementation of POSIX*** *by applying the rule, and that commutativity is essential to achieving scalability and performance on real hardware. ”* [4]

Fazit

Es bleibt spannend!

Agenda

Verlässliche Systemsoftware – Motivation

☞ **Systemsoftware** (von eingebetteten Systemen) **begeistert**

- Neue Verfahren und Architekturen zu entwickeln, ist spannend!
- Mikrokerne schotten Programme räumlich voneinander ab
- Verschlüsselungsalgorithmen garantieren Datensicherheit
- Echtzeitsysteme erlaubten ein zeitlich vorhersagbares Verhalten

  → Prioritätsorientierte Einplanung von Arbeitsaufträge
- ...

⚠ **Das ist jedoch nur die halbe Miete**

- Erfordert möglichst fehlerfreie Implementierungen
- Implementierung muss mit Laufzeitfehlern umgehen können

→ Verfahren und Architekturen müssen korrekt arbeiten!

☞ **Wie lassen sich Fehler vermeiden bzw. behandeln?**

Verlässliche Systemsoftware – Ausrichtung

Im Fokus dieser Veranstaltung: **Software**

1. **Zuverlässige (robuste) Software entwickeln**
   - Robustheit gegenüber externen Fehlern (zur Laufzeit)
     - Wie erkenne und toleriere ich solche Fehler?
   - Wie testet man, ob man korrekt mit solchen Fehlern umgeht?
   - Hier „forschen“ wir (hoffentlich auch zusammen mit euch)

2. **Software zuverlässig entwickeln**
   - Wie kommt man zu einer möglichst fehlerfreien Implementierung?
   - Welche Werkzeuge helfen mir dabei?
     - Was tun diese Werkzeuge eigentlich?
     - Welche Grenzen haben diese Werkzeuge demzufolge?
   - Hier „lernen“ wir zusammen mit euch

Lernziele – Robustheit

☞ **Zuverlässige (robuste) Software entwickeln**

- Maskieren von Fehlern durch Redundanz
  - → Replizierte Ausführung
  - – Homogene und heterogene Redundanz
- Härtung von Datenstrukturen und Kontrollfluss
  - → Informationsredundanz
  - – In Daten mithilfe von z.B. Prüfsummen
  - – In Berechnungen/Kontrollfluss mithilfe arithmetischer Codierung
- Evaluierung von Fehlertolanzmaßnahmen
  - – Fehlerinjektion und Testen

☞ Anknüpfungspunkte für den praktischen Einsatz aufzeigen

- Niemand braucht das 1001. Fehlertoleranzprotokoll!
  - Das den gegenwärtigen Stand der Kunst nicht reflektiert
  - Obendrein vielleicht fehlerhaft ist

Lernziele – Zuverlässigkeit

☞ Software zuverlässig entwickeln

- Typische Laufzeitfehler in C/C++-Programmen suchen und finden
  - Nullzeiger, Ganzzahlüberläufe, nicht initialisierte Speicherstellen, . . .
  - → Durch Testen oder mittels statischer Analysewerkzeuge
- Testüberdeckung: Wie gut hat man getestet?
  - die Testüberdeckung für ein gegebenes Programm messen
  - Gibt es Zusammenhänge zwischen der Testüberdeckung, der Testfallanzahl und anderen Metriken?
- Design-by-contract: statische, werkzeug-gestützte Verifikation
  - Formulierung/Verifikation von Nachbedingungen für kleine C-Programme
  - Mithilfe von Werzeugen (AbsInt Astrée) wie sie auch Airbus einsetzt

☞ Vorurteile gegenüber formalen Methoden abbauen

- Keine unverwendbaren Monster mehr
  - Vollbringen aber auch keine Wunder
  - Ihre Anwendung ist noch immer mühsam, aber sie lohnt sich

Agenda

Vorbereitung

- Geprüft wird der Stoff der Vorlesung
  - ihr müsst **nicht** den Quellcode (auswendig) kennen
  - aber das Prinzip müsst ihr erklären können!
  - übt mit Kommilitonen, erklärt euch gegenseitig die Vorgehensweise
- alte Prüfungsprotokolle online bei der FSI Informatik:
  https://fsi.cs.fau.de/dw/pruefungen/hauptstudium/ls4/bs
- *bei Prüfungsabsage:* Bitte immer eine (kurze) Mail
  - immer. Egal wie kurzfristig.
  - aber je früher desto besser
  - ggf. auch gleich Wunschersatztermin

Judgement Day: Präsenz

- kommt [über]pünktlich
- und ausgeschlafen ☺
- ein Prüfer und ein protokollierender Beisitzer
- statt schweigend zu denken, lieber eure Überlegung aussprechen

  ⇒ man darf nur bepunkten, was ihr von euch gebt
  (und der Prüfer kann euch auf den richtigen Weg bringen)
- sollten Worte fehlen/nicht ausreichen, so habt ihr Stift und Papier
- die 30 Minuten sind schnell vorbei
- ihr bekommt nach weiteren 1-10 Minuten eure Note

Judgement Day: Fernprüfung

- wir verwenden BigBlueButton (oder auch Zoom)
- ihr bekommt den Raumlink rechtzeitig vorher per Mail
- ihr braucht Kamera und Mikrofon
- außerdem Tastatur, um bei Bedarf in die *Shared Notes* zu tippen
- sonst wie Präsenzprüfung
- bei Internet-/PC-/Stromausfall: **Keine Panik**
  - ggf. einfach per Telefon/Mail Bescheid geben wenn es länger dauert (und Mobilfunknetz noch tut)
- Wechsel von Präsenz- auf Fernprüfung **immer möglich**

Agenda

Ziele und Zielerreichung
Betriebssystemforschung
SS 2024 am Lehrstuhl - VSS
Prüfung (☠)
Examensarbeiten
Ausblick
Referenzen

Examensarbeiten@SYS

Zur Zeit im Angebot:

- (Bachelorarbeiten)
- Masterarbeiten

`https://sys.cs.tu-dortmund.de/de/lehre/abschlussarbeiten/`

➔Ist ok, aber lieber ...

⚠ ... persönlich nachfragen...! ⚠

Das war's :-)

Das BS-Team wünscht
erfolgreiche und erholsame
„Semesterferien“

. . . und ein Wiedersehen
im Sommersemester 2024!

Referenzen

[1] Andrew Baumann, Paul Barham, Pierre-Evariste Dagand u. a. „The multikernel: a new OS architecture for scalable multicore systems“. In: *Proceedings of the 22nd ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP '09)*. ACM Press. Big Sky, MT, USA: ACM Press, Okt. 2009, S. 29–44. isbn: 978-1-60558-752-3. doi: 10.1145/1629575.1629579.

[2] Silas Boyd-Wickizer, Haibo Chen, Rong Chen u. a. „Corey: An Operating System for Many Cores“. In: *8th Symposium on Operating System Design and Implementation (OSDI '08)*. USENIX Association. San Diego, CA, USA: USENIX Association, Dez. 2008, S. 43–57. isbn: 978-1-931971-65-2. url: https://www.usenix.org/legacy/event/osdi08/tech/full_papers/boyd-wickizer/boyd_wickizer.pdf.

[3] Silas Boyd-Wickizer, Austin T. Clements, Yandong Mao u. a. „An Analysis of Linux Scalability to Many Cores“. In: *9th Symposium on Operating System Design and Implementation (OSDI '10)*. USENIX Association. Vancouver, BC, Canada: USENIX Association, Okt. 2010. isbn: 978-1-931971-79-9.

[4] Austin T. Clements, M. Frans Kaashoek, Nickolai Zeldovich u. a. „The Scalable Commutativity Rule: Designing Scalable Software for Multicore Processors“. In: *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP '13)* (Farmington, PA, USA). ACM Press. New York, NY, USA: ACM Press, 2013, S. 1–17. isbn: 978-1-4503-2388-8. doi: 10.1145/2517349.2522712.

Referenzen (Forts.)

[5] Sean Dorward, Rob Pike, Dave Presotto u. a. „The Inferno Operating System“. In: *Bell Labs Technical Journal* 2.1 (Winter 1997).

[PFP] Norbert Oster. *Parallele und Funktionale Programmierung*. Vorlesung mit Übung. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Informatik 2, 2015 (jährlich). url: https://www2.cs.fau.de/teaching/SS2015/PFP/index.html.

[6] Rob Pike. *Systems Software Research is Irrelevant*. Talk. CS Colloquium, Columbia University. url: http://herpolhode.com/rob/utah2000.pdf (besucht am 09. 12. 2010).

[7] Rob Pike, Dave Presotto, Sean Dorward u. a. „Plan 9 from Bell Labs“. In: *Computing Systems* 8.3 (1995), S. 221–254.

[8] Donald E. Porter, Owen S. Hofmann, Christopher J. Rossbach u. a. „Operating System Transactions“. In: *Proceedings of the 22nd ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP '09)*. ACM Press. Big Sky, MT, USA: ACM Press, Okt. 2009, S. 161–176. isbn: 978-1-60558-752-3. doi: 10.1145/1629575.1629591.

[9] *Proceedings of the 22nd ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP '09)*. ACM Press. Big Sky, MT, USA: ACM Press, Okt. 2009. isbn: 978-1-60558-752-3.

[10] Linus Torvalds und David Diamond. *Just for Fun: The Story of an Accidental Revolutionary*. HarperCollins, 2001. isbn: 978-0066620725.

Referenzen (Forts.)

[BST] Peter Ulbrich. *Betriebssystemtechnik*. Vorlesung mit Übung. Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Informatik 12, 2024 (jährlich). url: https://sys.cs.tu-dortmund.de/de/lehre/.

[11] David Wentzlaff und Anant Agarwal. „Factored Operating Systems (fos): The Case for a Scalable Operating System for Multicores“. In: *ACM SIGOPS Operating Systems Review* 43 (2 Apr. 2009), S. 76–85. issn: 0163-5980. doi: 10.1145/1531793.1531805.