Systemprogrammierung

Grundlage von Betriebssystemen

Teil B – V.3 Rechnerorganisation: Betriebssystemmaschine

Wolfgang Schröder-Preikschat

3. Juni 2015

Agenda

Gliederung

Lehrstoff

- den Prozessor der Maschinenprogrammebene als **hybride Maschine** kennenlernen und sein **Operationsprinzip** begreifen
  - Ablauf der Teilinterpretation von Maschinenprogrammen verinnerlichen
  - den Aspekt der Ablaufinvarianz eines Betriebssystems nachvollziehen
- Gemeinsamkeiten und Unterschiede von synchronen und asynchronen **Programmunterbrechungen** verstehen
  - Konzepte „*Trap*“ und „*Interrupt*“ differenzieren, voneinander abgrenzen
  - beide als Ausnahme von der normalen Programmausführung sehen
  - den Prozessorstatus bzw. -zustand eines Programmablaufs identifizieren
  - daraus Implikationen für die Unterbrechungsbehandlung ableiten
- ein Betriebssystem als **nichtsequentielles Programm** erkennen und in die „Untiefe“ solcher Programme einführen
  - durch Wettlaufsituationen verursachte Laufgefahren beispielhaft erläutern
  - eine erste Einführung zum zentralen Begriff „kritischer Abschnitt“ geben

virtuelle Maschine ↔ **Betriebssystem** ↔ hybride Maschine

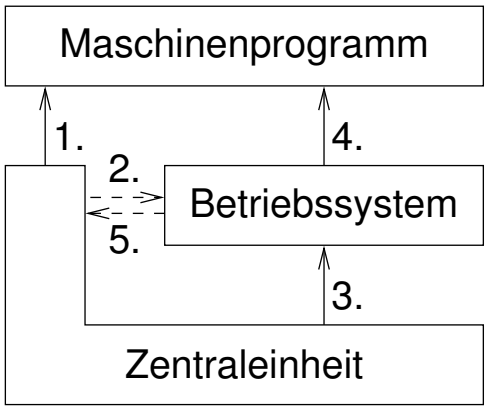
Elementaroperationen der Maschinenprogrammebene

- Maschinenprogramme umfassen zwei Sorten von Befehlen [2, S. 5]:
  - i Anweisungen an das Betriebssystem, das Ebene_3 implementiert
    - explizit als **Systemaufruf** (*system call*) kodiert
    - implizit als **Programmunterbrechung** (*trap*, *interrupt*) ausgelöst
  - ii Anweisungen an die CPU, die $\text{Ebene}_{[2,3]}$ implementiert
    - Ebene_2 direkt, nur dort ist die Ausführung aller Befehle der CPU gültig
    - Ebene_3 indirekt, in enger Kooperation mit dem Betriebssystem
- wirklich/echt ausführende Instanz ist jedoch immer die CPU
  - reine Ebene_3-Befehle { werden „wahrgenommen“, nicht ausgeführt, signalisieren jew. eine Ausnahme (*exception*), die ans Betriebssystem „hochgereicht“ wird um dort behandelt zur werden.
- Betriebssysteme fangen Ebene_3-Befehle ab, behandeln Ausnahmen
  - sie bilden jeweils eine (logisch) eigenständige **Maschine**
  - die die von ihr ausführenden Befehle von der CPU zugestellt bekommt

Ausführung von Maschinenprogrammen I

- Voraussetzung:
  1. die CPU (Zentraleinheit) interpretiert das Maschinenprogramm befehlsweise,
  2. setzt dessen Ausführung aus,
     - Ausnahmesituation
     - **Programmunterbrechung**

     startet das Betriebssystem und
  3. interpretiert die Programme des Betriebssystems befehlsweise.

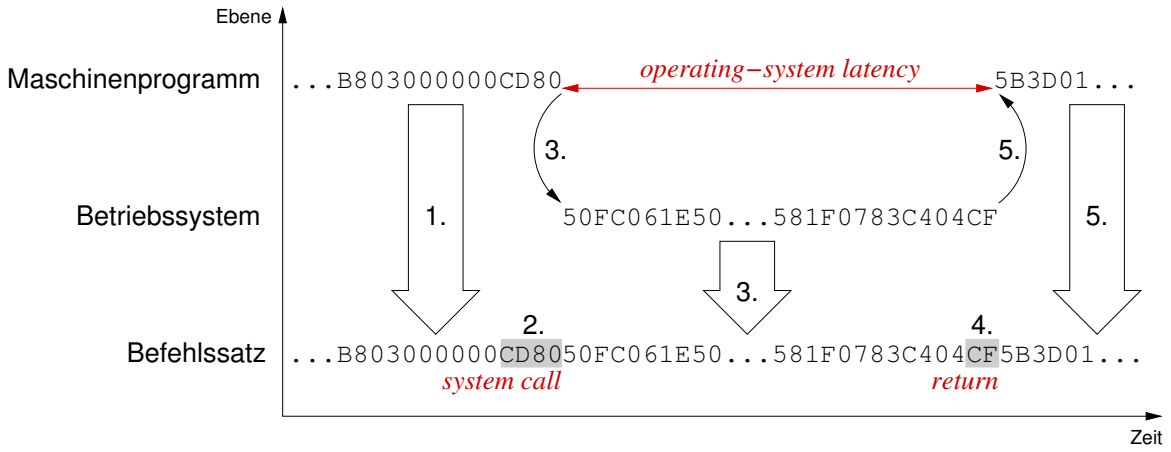


- Folge von 3., der Ausführung von Betriebssystemprogrammen:
  4. das Betriebssystem interpretiert das soeben oder zu einem früheren Zeitpunkt unterbrochene Maschinenprogramm befehlsweise und
  5. instruiert die CPU (Zentraleinheit), die Ausführung des/eines zuvor unterbrochenen Maschinenprogramms wieder aufzunehmen.

In Phase 1. ist nur eine Teilmenge von Ebene_2-Befehlen direkt von der CPU ausführbar, in Phase 3. dagegen alle.

Ausführung von Maschinenprogrammen II

- logischer Aufbau des Befehlsstroms für die Zentraleinheit, in Analogie zu den umseitig (S. 6) genannten fünf Phasen:



1. Ausführung eines Maschinenprogramms durch die Zentraleinheit (CPU)
2. Wahrnehmung einer synchronen/asynchronen Programmunterbrechung
3. Verzweigung zum Betriebssystem, Unterbrechungsbehandlung
4. Beendigung der Programmunterbrechung (*interrupt return*)
5. Rückverzweigung zum Maschinenprogramm

Unterbrechung von Betriebssystemprogrammen

Die in Phase 3. (S. 6) erfolgende Ausführung von Programmen des Betriebssystems kann ebenfalls ausgesetzt werden.
Jede Programmausführung kann eine Unterbrechung erfahren, wenn der ausführende Prozessor dazu befähigt ist.

- **ablaufinvariant** (*re-entrant*) ausgelegte Betriebssysteme ermöglichen den **Wiedereintritt** während der eigenen Ausführung
  - auch wenn Betriebssysteme normalerweise keine Systemaufrufe absetzen, können sie sehr wohl von Programmunterbrechungen betroffen sein:
    - i im Kontext der Ausführung des Systemaufrufs eines Maschinenprogramms ☺
    - ii hervorgerufen durch Peripheriegeräte (Ein-/Ausgabe, Zeitgeber) ☺
    - iii bedingt durch einen Programm(ier)fehler ⇝ **Panik** ☹
  - die in der Folge notwendige Unterbrechungsbehandlung gestaltet sich wie eine **indirekte Rekursion**
    - das Betriebssystem wird in seiner Definition selbst nochmals aufgerufen
    - nämlich indirekt durch die CPU im Rahmen der partiellen Interpretation
- der Wiedereintritt kann **asynchron** erfolgen, was das Betriebssystem insgesamt als **nichtsequentielles Programm** darstellt

Zwischenzusammenfassung

- Befehle der Maschinenprogrammbene, also Ebene_3-Befehle sind...
  - „normale“ Befehle der Ebene_2, die die CPU direkt ausführen kann
    - **unprivilegierte Befehle**, die in jedem Arbeitsmodus ausführbar sind
  - „unnormale“ Befehle der Ebene_2, die das Betriebssystem ausführt
    - **privilegierte Befehle**, die nur im privilegierten Arbeitsmodus ausführbar sind
- die „aus der Reihe fallenden“ Befehle stellen Adressräume, Prozesse, Speicher, Dateien und Wege zur Ein-Ausgabe bereit
  - Interpreter dieser Befehle ist das Betriebssystem
  - der dadurch definierte Prozessor ist die **Betriebssystemmaschine**
- demzufolge ist ein Betriebssystem immer nur ausnahmsweise aktiv:
  - es muss von außerhalb aktiviert werden
    - programmiert im Falle eines Systemaufrufs (`CD80`: Linux/x86) oder einer sonstigen synchronen Programmunterbrechung (*trap*)
    - nicht programmiert, also nicht vorhergesehen, im Falle einer asynchronen Programmunterbrechung (*interrupt*)
  - es deaktiviert sich immer selbst, in beiden Fällen programmiert (`CF`: x86)

Gliederung

Unterbrechungsarten und Ausnahmesituationen

- die Ausnahmesituationen der Ebene$_2$ fallen in zwei Kategorien:
  i die „Falle“ (*trap*)
  ii die „Unterbrechung“ (*interrupt*)
- **Unterschiede** ergeben sich hinsichtlich. . .
  - Quelle
  - Synchronität
  - Vorhersagbarkeit
  - Reproduzierbarbeit
- ihre **Behandlung ist zwingend** und grundsätzlich prozessorabhängig
  - aufwerfen (*raising*) einer Ausnahme kommt entweder einem realen (CPU) oder einem abstrakten (Betriebssystem) Prozessor zu
    - die CPU wirft eine Ausnahme der Hardware (IRQ, NMI, Fehler)
    - das Betriebssystem wirft eine Ausnahme der Software (POSIX: SIG∗)
  - wogegen die Behandlung (*handling*) einem abstrakten Prozessor obliegt
    - Hardwareausnahmen behandelt das Betriebssystem (auf Ebene$_2$)
    - Betriebssystemausnahmen behandelt das Maschinenprogramm (auf Ebene$_3$)

Synchrone Programmunterbrechung

- unbekannter Befehl, falsche Adressierungsart oder Rechenoperation
- Systemaufruf, Adressraumverletzung, unbekanntes Gerät
- Seitenfehler im Falle lokaler Ersetzungsstrategien

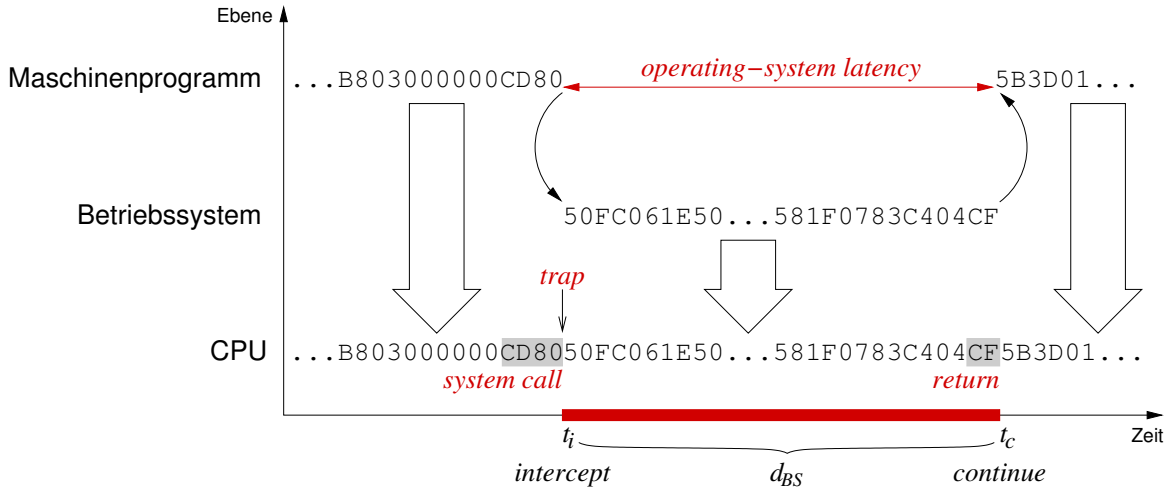
Trap — synchron, vorhersagbar, reproduzierbar

Ein in die Falle gelaufenes („getrapptes“) Programm, das unverändert wiederholt und jedesmal mit den selben Eingabedaten versorgt auf ein und dem selben Prozessor zur Ausführung gebracht wird, wird auch immer wieder an der selben Stelle in die selbe Falle tappen.

- durch das Programm in Ausführung (≡ Prozess) selbst ausgelöst
- als Folge der Interpretation eines Befehls des ausführenden Prozessors

- im **Fehlerfall** ist die Behebung der Ausnahmebedingung zwingend

Synchrone Programmunterbrechung — *Trap*



Betriebssystemlatenz

(s. auch Fußnote 2 auf S. 19)

*Verzögerung zwischen dem Abfangen der Unterbrechung durch den **Unterbrechungshandhaber** (interrupt handler) bzw. **Fallenhandhaber** (trap handler) und seiner Beendigung.*

d_{BS}
- muss begrenzt sein für ein echtzeitfähiges Betriebssystem
- **maximale Ausführungszeit** (*worst-case execution time*, WCET)

Asynchrone Programmunterbrechung

- Signalisierung „externer“ Ereignisse
- Beendigung einer DMA- bzw. E/A-Operation
- Seitenfehler im Falle globaler Ersetzungsstrategien

Interrupt — asynchron, unvorhersagbar, nicht reproduzierbar

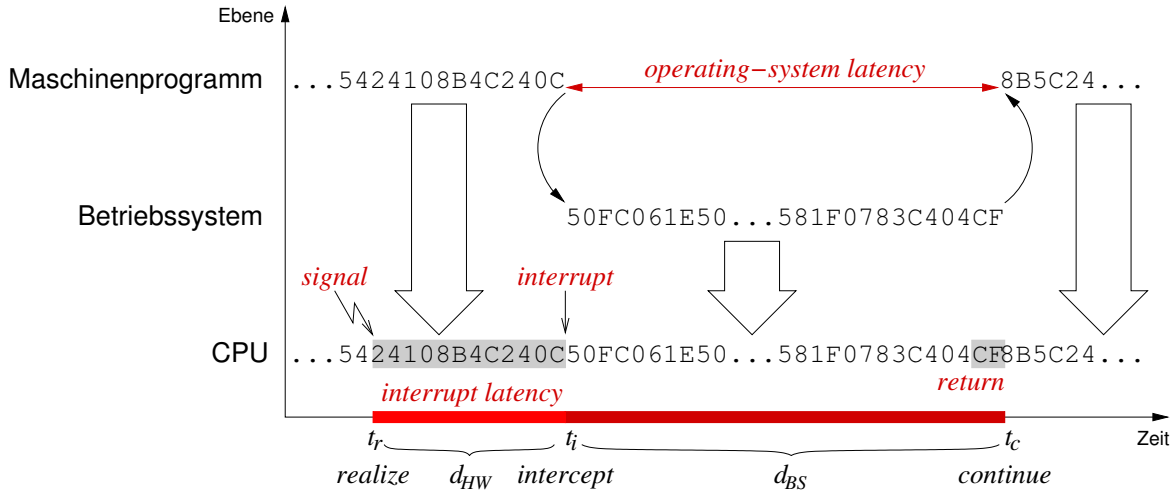
Ein „externer Prozess“ (z.B. ein Gerät) signalisiert einen Interrupt unabhängig vom Arbeitszustand des gegenwärtig sich in Ausführung befindlichen Programms.

Ob und ggf. an welcher Stelle das betreffende Programm unterbrochen wird, ist nicht vorhersehbar.

- durch einen anderen, externen (Soft-/Hardware-) Prozess ausgelöst
- unabhängig von der Befehlsinterpretation des ausführenden Prozessors

- **Nebeneffektfreiheit** der Unterbrechungsbehandlung ist zwingend

Asynchrone Programmunterbrechung — *Interrupt*



Unterbrechungslatenz

Verzögerung zwischen der Wahrnehmung (CPU) und dem Abfangen (Betriebssystem) der Unterbrechung durch den ***Unterbrechungshandhaber*** *(interrupt handler).*

d_{HW} i Restausführungszeit des laufenden Befehls der CPU plus
ii restliche Dauer einer **Unterbrechungssperre** im Betriebssystem

Interferenz

Unvorhersagbare Laufzeitvarianzen

- asynchrone Programmunterbrechungen verursachen **Zittern** (*jitter*) im Ablaufverhalten, machen Programme **nicht-deterministisch**
  - nicht zu jedem Zeitpunkt ist bestimmt, wie weitergefahren wird
- je nach „Räumlichkeit“ des unterbrochenen (P_i) und behandelnden (P_h) Programms ergeben sich verschiedene Ausprägungen

  getrennt
  - P_i auf Ebene$_3$, P_h auf Ebene$_2$
  - in räumlicher Hinsicht hat P_h keinen Einfluss auf P_i

  gemeinsam
  - P_i und P_h zusammen auf Ebene$_3$ oder Ebene$_2$
  - in räumlicher Hinsicht kann P_h einen Einfluss auf P_i haben
  - P_i und P_h bilden ein **nichtsequentielles Programm**
  - aber in beiden Fällen wird P_i um die jeweilige Dauer von P_h verzögert
- in zeitlicher Hinsicht beeinflusst die Unterbrechungsart „*interrupt*“ jedes Programm, dessen Ausführung eben dadurch ausgesetzt wird
  - dies ist kritisch für **echtzeitabhängige Programme**[1]

[1] Deren korrektes Verhalten hängt nicht nur von den logischen Ergebnissen von Berechnungen ab, sondern auch von dem physikalischen Zeitpunkt der Erzeugung und Verwendung der Berechnungsergebnisse. [3]

Gliederung

Ausnahmen von der normalen Programmausführung

*Ausführungsunterbrechungen sind **unnormale Ereignisse**, die den unterbrochenen Programmablauf unerwünscht verzögern und nicht immer durch ihn selbst auch verursacht sind.*

- Signale von der Peripherie (z.B. E/A, Zeitgeber oder „Wachhund“)
- Wechsel der Schutzdomäne (z.B. Systemaufruf)
- Programmierfehler (z.B. ungültige Adresse)
- unerfüllbare Speicheranforderung (z.B. bei Rekursion)
- Einlagerung auf Anforderung (z.B. beim Seitenfehler)
- Warnsignale von der Hardware (z.B. Energiemangel)

*Im Betriebssystem sind Maßnahmen zur **Ereignisbehandlung** unabdingbar, im Maschinenprogramm dagegen nicht.*

- sie sind in beiden Fällen jedoch immer problemspezifisch auszulegen

Abrupter Wechsel des Laufzeitkontextes

- Programmunterbrechungen implizieren **nicht-lokale Sprünge**:

  vom { unterbrochenen / behandelnden } Programm zum { behandelnden / unterbrochenen } Programm

- der **Unterbrechungshandhaber**[2] wird plötzlich aktiviert und sein (exakter) Aktivierungszeitpunkt ist nicht vorhersehbar
  - der **Prozessorstatus** des unterbrochenen Programms ist daher während der Unterbrechungsbehandlung **invariant** zu halten
    - Sicherung vor Ansprung bzw. Start der Behandlungsroutine
    - Wiederherstellung vor Rücksprung zum unterbrochenen Programm
  - Mechanismen dazu liefert die Befehlssatzebene (CPU) bzw. das jeweils behandelnde Programm (Betriebssystem) selbst
- führt zu **Betriebslast** (*overhead*), deren Höhe die Programmierebene des Betriebssystems und die Befehlssatzebene bestimmt

[2] Dem deutschen Patentwesen entnommen, das die englische Bezeichnung „*handler*“ fachbegrifflich als „Handhaber“ übersetzt. Dort wird „*trap*“ sachlich und fachlich korrekt auch als „Falle“ verstanden (vgl. auch S. 13).

Prozessorstatus invariant halten

- die CPU führt eine **totale oder partielle Zustandssicherung** durch
  - minimal: Statusregister (SR) und Befehlszeiger (*program counter*, PC)
  - maximal: den kompletten Registersatz
  - je nach CPU werden dabei wenige bis sehr viele Daten(bytes) bewegt
- das Betriebssystem sichert den restlichen Zustand

  alle { dann noch ungesicherten / flüchtigen[a] / im weiteren Verlauf verwendeten } CPU-Register

[a] Register, deren Inhalte nach Rückkehr von einem Prozeduraufruf verändert worden sein dürfen: festgelegt in den **Prozedurkonventionen** des Kompilierers.

- die erste Option betrifft ein Betriebssystem, das mit Sprachkonzepten der Ebene$_4$ (d.h., in Assembliersprache) programmiert wurde
- demgegenüber betreffen die letzten beiden Optionen ein in Hochsprache (Ebene$_5$) programmiertes Betriebssystem

Option 1: Alle dann noch ungesicherten...

- **Mantelprozedur** (*wrapper procedure*) zur totalen Statussicherung:
  - Behandlungsroutine (`handler`) in Assembliersprache programmiert

```
1 train:
2   pushal
3   call handler
4   popal
5   iret
```

m68k

```
1 train:
2   moveml d0-d7/a0-a6,a7@-
3   jsr handler
4   moveml a7@+,d0-d7/a0-a6
5   rte
```

- `train` (trap/interrupt):
  2. alle Arbeitsregisterinhalte im RAM (Stapelspeicher) sichern
  3. Unterbrechungsbehandlung durchführen
  4. im RAM gesicherten Arbeitsregisterinhalte wiederherstellen
  5. Ausführung des unterbrochenen Programms wieder aufnehmen
- beteiligte Prozessoren:
  - CPU (Ebene$_2$), Betriebssystem (Ebene$_3$)

Option 2: Alle flüchtigen...

- **Mantelprozedur** (*wrapper procedure*) zur partiellen Statussicherung:
  - Behandlungsroutine (`handler`) in Hochsprache programmiert

```
1 train:
2   pushl %edx; pushl %ecx; pushl %eax
3   call  handler
4   popl  %eax; popl  %ecx; popl  %edx
5   iret
```

m68k

```
1 train:
2   moveml d0-d1/a0-a1,a7@-
3   jsr handler
4   moveml a7@+,d0-d1/a0-a1
5   rte
```

- `train` (trap/interrupt):
  2. Inhalte flüchtiger Arbeitsregister im RAM (Stapelspeicher) sichern
  3. Unterbrechungsbehandlung durchführen
  4. im RAM gesicherten Arbeitsregisterinhalte wiederherstellen
  5. Ausführung des unterbrochenen Programms wieder aufnehmen
- beteiligte Prozessoren:
  - CPU (Ebene$_2$), Betriebssystem (Ebene$_3$), Kompilierer (Ebene$_5$)

Option 3: Alle im weiteren Verlauf verwendeten...

- **Mantelprozedur** (*wrapper procedure*) zur Statussicherung:
  - Behandlungsroutine (`handler`) in Hochsprache programmiert

```
1 inline void __attribute__ ((interrupt)) train () {
2     handler();
3 }
```

- `__attribute__ ((interrupt))`:
  - Generierung der speziellen Maschinenbefehle durch den **Kompilierer**
    - zur Sicherung/Wiederherstellung der Arbeitsregisterinhalte
    - zur Wiederaufnahme der Programmausführung
  - nicht jeder „Prozessor“ (für C/C++) implementiert dieses Attribut
- beteiligte Prozessoren:
  - CPU (Ebene_2), Kompilierer (Ebene_5)

Gliederung

Nichtdeterministisches Programm

```
1  int wheel = 0;
```

- welche `wheel`-Werte gibt `main()` aus?

```
2  main () {
3      for (;;)
4          printf("%u\n", wheel++);
5  }
```

- normalerweise fortlaufende Werte im Bereich[3] $[0, 2^{32} - 1]$, Schrittweite 1
- angenommen `niam()` unterbricht `main()`: welche Ausgabewerte nun?

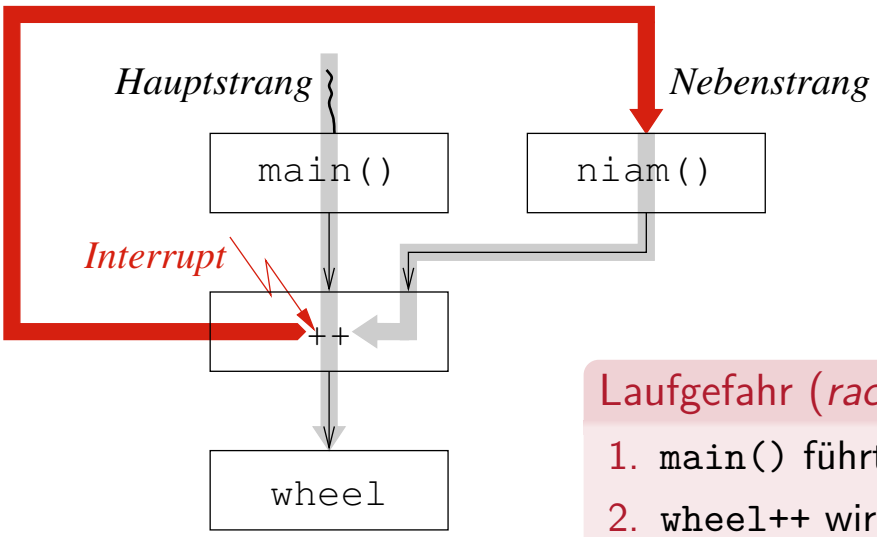
```
6  void __attribute__ ((interrupt)) niam () {
7      wheel++;
8  }
```

- mit Schrittweite n, $0 \leq n \leq 2^{32} - 1$, jenachdem:
  - i wie `wheel++` vom Kompilierer für die zugrunde liegende CPU übersetzt und
  - ii wie oft und wo `main()` dann von `niam()` unterbrochen wurde
- $n = 1$ impliziert nicht, dass keine Unterbrechung stattgefunden hat

Asynchrone Programmunterbrechungen *bewirken, dass nicht zu jedem Zeitpunkt bestimmt ist, wie weitergefahren wird. (S. 16)*

[3] Annahme: `sizeof(unsigned int)` = 4 Bytes je acht Bits, d.h. 32 Bits.

Asynchronität von Programmunterbrechungen



Laufgefahr (*race hazard*)

1. `main()` führt `wheel++` aus
2. `wheel++` wird unterbrochen
3. der *Interrupt* führt zu `niam()`
4. `niam()` führt `wheel++` aus
5. `wheel++` überlappt sich selbst

Teilbarkeit von Aktionen[4]

(vgl. auch S. 34)

- `wheel++` ist eine **Elementaroperation** (kurz: Elop) der Ebene$_5$
  - in Hochsprache formuliert ist diese Aktion scheinbar **atomar**, **unteilbar**
- nicht zwingend ist `wheel++` auch eine Elop der Ebene$_4$ (und tiefer)
  - in Assemblier-/Maschinensprache formuliert ist diese Aktion **teilbar**

	`main()`	`niam()`
Ebene$_5$	`wheel++`	

Ebene$_4$	`movl wheel,%edx`
	`leal 1(%edx),%eax`
	`movl %eax,_wheel`
		`incl wheel`

# Elop	3	1

  - dies trifft insbesondere auch auf die dreiphasige Aktion `incl wheel` zu:
    - den Wert (1) von `wheel` laden, (2) verändern und (3) an `wheel` speichern
  - ein ***read-modify-write*-Zyklus**, teilbar bei Mehr-/Viel(kern)prozessoren
- im **Unterbrechungsfall** ist die gleichzeitige Ausführung von `wheel++` möglich, was falsche Berechnungsergebnisse liefern kann

[4] Aktion ist die Ausführung einer Anweisung einer (virtuellen/realen) Maschine.

Unterbrechungsbedingte Überlappungseffekte

- `niam()`-Ausführung überlappt `main()`-Ausführung:

`wheel`	Befehls-folge	`main()`			`niam()`
		x86-Befehl	%edx	%eax	*x86-Befehl*
42	1	`movl wheel,%edx`	42	?	
43	2				`incl wheel`
43	3	`leal 1(%edx),%eax`	42	43	
43	4	`movl %eax,wheel`	42	43	

  - zweimal `wheel++` durchlaufen (nämlich je einmal in `main()` und `niam()`)
  - zweimal gezählt, den Wert von `wheel` aber nur um eins erhöht
- in nichtsequentiellen Programmen (wie hier) ist die Implementierung des Inkrementoperators[5] ++ als **kritischer Abschnitt** aufzufassen

> *critical in the sense, that the processes have to be constructed in such a way, that at any moment at most one of the two is engaged in its **critical section**. [1, S. 11]*

[5] Gleiches gilt für den Dekrementoperator, egal ob Prä- oder Postfix.

Semantikkonforme Elementaroperation

- der **Postfix-Inkrementoperator** (`wheel++`) hat folgende Semantik:
  - i den Wert des Operanden (`wheel`) als Ausdruckswert bereitstellen und
  - ii danach dem Operanden den um eins erhöhten (++) Wert zuweisen
- logisch geschieht dieses „***fetch and add***“ (FAA) in einem Schritt
  - um der Laufgefahr vorzubeugen, muss diese Aktion physisch unteilbar sein
- dies leistet `xadd` (x86):
  - i $tmp \leftarrow dst$
  - ii $dst \leftarrow tmp + src$
  - iii $src \leftarrow tmp$
  - $src = 1$, $dst = wheel$
- den Befehl durchsetzen
  - *inline assembler* (gcc)

```
1  inline int FAA(int *ref, int val) {
2      int aux = val;
3
4      asm volatile ("xaddl %0, %1"
5          : "=g" (aux), "=m" (*ref)
6          : "0" (aux), "m" (*ref)
7          : "memory", "cc");
8
9      return aux;
10 }
```

- für `printf()` die nunmehr unteilbare Aktion sicherstellen:

```
11 printf("%u\n", FAA(&wheel, 1));
```

```
12  ...
13  movl   $1, %eax
14  xaddl  %eax, wheel
15  ...
```

Unteilbarer Grundblock

Programmunterbrechungen abschalten

Definition (Grundblock (*basic block*))

Ein aus einer Anweisungsfolge bestehender Programmabschnitt mit genau einem Eintrittspunkt und einem Austrittspunkt.

- wenn die Abbildung einer in Hochsprache ausformulierten kritischen Operation auf einen elementaren Maschinenbefehl nicht gelingt
  - weil die Operation zu komplex ist oder ein äquivalenter Maschinenbefehl nicht existiert, gefunden werden kann oder gesucht werden will
  - muss die fragliche Operation als kritischer Abschnitt ausformuliert werden
- **Unterbrechungssperre**
  - 4 ■ IRQ abwehren
  - 5–6 ■ unteilbar, atomar
  - 7 ■ IRQ zulassen

  IRQ ■ *interrupt request*
- **Holzhammermethode**
  - Kollateraleffekte
  - Alternative [4, S. 5–15]

```
1  int_t FAA(int_t *ref, int_t val) {
2      int_t aux;
3
4      enter(INTERRUPT_LOCK);
5      aux = *ref;
6      *ref += val;
7      leave(INTERRUPT_LOCK);
8
9      return aux;
10 }
```

vgl. auch S. 36*ff*

Gliederung

Resümee

. . . unterbrochene Programme sind nicht einfach

- zur Einführung wurden **virtuelle Maschinen** erneut aufgegriffen
  - um zu verdeutlichen, dass ein Betriebssystem eine **hybride Maschine** ist
  - die die **Teilinterpretation** von Maschinenprogrammen bewerkstelligt
    - was den Wiedereintritt ins Betriebssystem einschließt: **Ablaufinvarianz**
- das Mittel zur Teilinterpretation ist die **Programmunterbrechung**
  - *trap*: die synchron, vorhersagbar und reproduzierbar ist
  - *interrupt*: sich asynchron, unvorhersagbar und nicht reproduzierbar zeigt
  - wodurch unterbrochene Programme in ihrer Ausführung verzögert werden
- dabei ist der **Laufzeitkontext** unterbrochener Programme invariant
  - Unterbrechungen sind **Ausnahmen** von normalen Programmausführungen
  - sie haben **Sicherung/Wiederherstellung** des Prozessorstatus zur Folge
    - geleistet durch die Befehlssatzebene (CPU) und dem Betriebssystem
- asynchrone Programmunterbrechungen bringen **Nichtsequentialität**
  - die eine **Wettlaufsituation** bei der Programmausführung bewirken kann
  - der diesbezügliche Programmbereich ist ein **kritischer Abschnitt**
    - in dem sich zu jedem Zeitpunkt nur ein einziger Prozess befinden darf

Literaturverzeichnis I

[1] Dijkstra, E. W.:
Cooperating Sequential Processes / Technische Universiteit Eindhoven.
Eindhoven, The Netherlands, 1965 (EWD-123). –
Forschungsbericht. –
(Reprinted in *Great Papers in Computer Science*, P. Laplante, ed., IEEE Press, New York, NY, 1996)

[2] Kleinöder, J. ; Schröder-Preikschat, W. :
Maschinenprogramme.
In: Lehrstuhl Informatik 4 (Hrsg.): *Systemprogrammierung*.
FAU Erlangen-Nürnberg, 2015 (Vorlesungsfolien), Kapitel 5.2

[3] Kopetz, H. :
Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications.
Kluwer Academic Publishers, 1997. –
ISBN 0–7923–9894–7

[4] Schröder-Preikschat, W. :
Guarded Sections.
In: Lehrstuhl Informatik 4 (Hrsg.): *Concurrent Systems — Nebenläufige Systeme*.
FAU Erlangen-Nürnberg, 2014 (Vorlesungsfolien), Kapitel 10

Unteilbarkeit I

Definition (in Anlehnung an den Duden)

Das Unteilbarsein, um etwas als Einheit oder Ganzheit in Erscheinung treten zu lassen.

- eine Frage der „Distanz“ des Betrachters (Subjekts) auf ein Objekt
  - **Aktion** auf höherer, **Aktionsfolge** auf tieferer Abstraktionsebene

Ebene	Aktion	Aktionsfolge
5	`i++`	

4–3	`incl i`*	`movl i,%r`
		`addl $1,%r`*
		`movl %r,i`

	`addl $1,i`*	
2–1		* ***read*** *from memory into accumulator* ***modify*** *contents of accumulator* ***write*** *from accumulator into memory*

  - typisch für den Komplexbefehl eines „abstrakten Prozessors“ (C, CISC)

Unteilbarkeit II

Ganzheit oder Einheit einer Aktionsfolge, deren Einzelaktionen alle scheinbar gleichzeitig stattfinden (d.h., synchronisiert sind)

- wesentliche nichtfunktionale Eigenschaft für eine atomare Operation[6]
  - die logische Zusammengehörigkeit von Aktionen in zeitlicher Hinsicht
  - wodurch die Aktionsfolge als **Elementaroperation** (ELOP) erscheint

Beispiele von (kritischen) Aktionen zum Inkrementieren eines Zählers:

- Ebene $5 \mapsto 3$

C/C++

```
1  i++;
```

ASM

```
1  movl i, %eax
2  addl $1, %eax
3  movl %eax, i
```

- Ebene $3 \mapsto 2$

ASM

```
1  incl i
```

ISA

```
1  read   A from <i>
2  modify A by 1
3  write  A to <i>
```

- die Inkrementierungsaktionen (`i++`, `incl`) sind nur bedingt unteilbar
  - unterbrechungsfreier Betrieb (Ebene $5 \mapsto 3$), Uniprozessor (Ebene $3 \mapsto 2$)
  - Problem: zeitliche Überlappung von Aktionsfolgen hier gezeigter Art

[6] von (gr.) *átomo* „unteilbar“.

Ein-/Austrittsprotokolle

```
1  typedef enum safeguard {INTERRUPT_LOCK} safeguard_t;
2
3  extern void panic(char *);
4
5  inline void enter(safeguard_t type, ...) {
6      if (type == INTERRUPT_LOCK)
7          asm volatile ("cli" : : : "cc");
8      /* more safeguard variants... */
9      else
10         panic("bad safeguard");
11 }
12
13 inline void leave(safeguard_t type, ...) {
14     if (type == INTERRUPT_LOCK)
15         asm volatile ("sti" : : : "cc");
16     /* more safeguard variants... */
17     else
18         panic("bad safeguard");
19 }
```

Unteilbarer Grundblock Ebene$_4$

```
gcc -O3 -m32 -fomit-frame-pointer -static -S faa.c
```

```
1  FAA:
2    movl 4(%esp), %edx
3    cli
4    movl (%edx), %eax
5    movl 8(%esp), %ecx
6    addl %eax, %ecx
7    movl %ecx, (%edx)
8    sti
9    ret
```

oben `-D"int_t=long int"`

3–8 unteilbare Sequenz

rechts `-D"int_t=long long int"`

8–15 unteilbare Sequenz

`cli` *clear interrupt flag*, abschalten

`sti` *set interrupt flag*, einschalten

```
1  FAA:
2    subl $8, %esp
3    movl %ebx, (%esp)
4    movl 16(%esp), %ecx
5    movl %esi, 4(%esp)
6    movl 20(%esp), %ebx
7    movl 12(%esp), %esi
8    cli
9    movl (%esi), %eax
10   movl 4(%esi), %edx
11   addl %eax, %ecx
12   adcl %edx, %ebx
13   movl %ecx, (%esi)
14   movl %ebx, 4(%esi)
15   sti
16   movl (%esp), %ebx
17   movl 4(%esp), %esi
18   addl $8, %esp
19   ret
```