# Betriebssysteme (BS)

## VL 5 – Unterbrechungen, Software

**Volkmar Sieh** / **Daniel Lohmann**

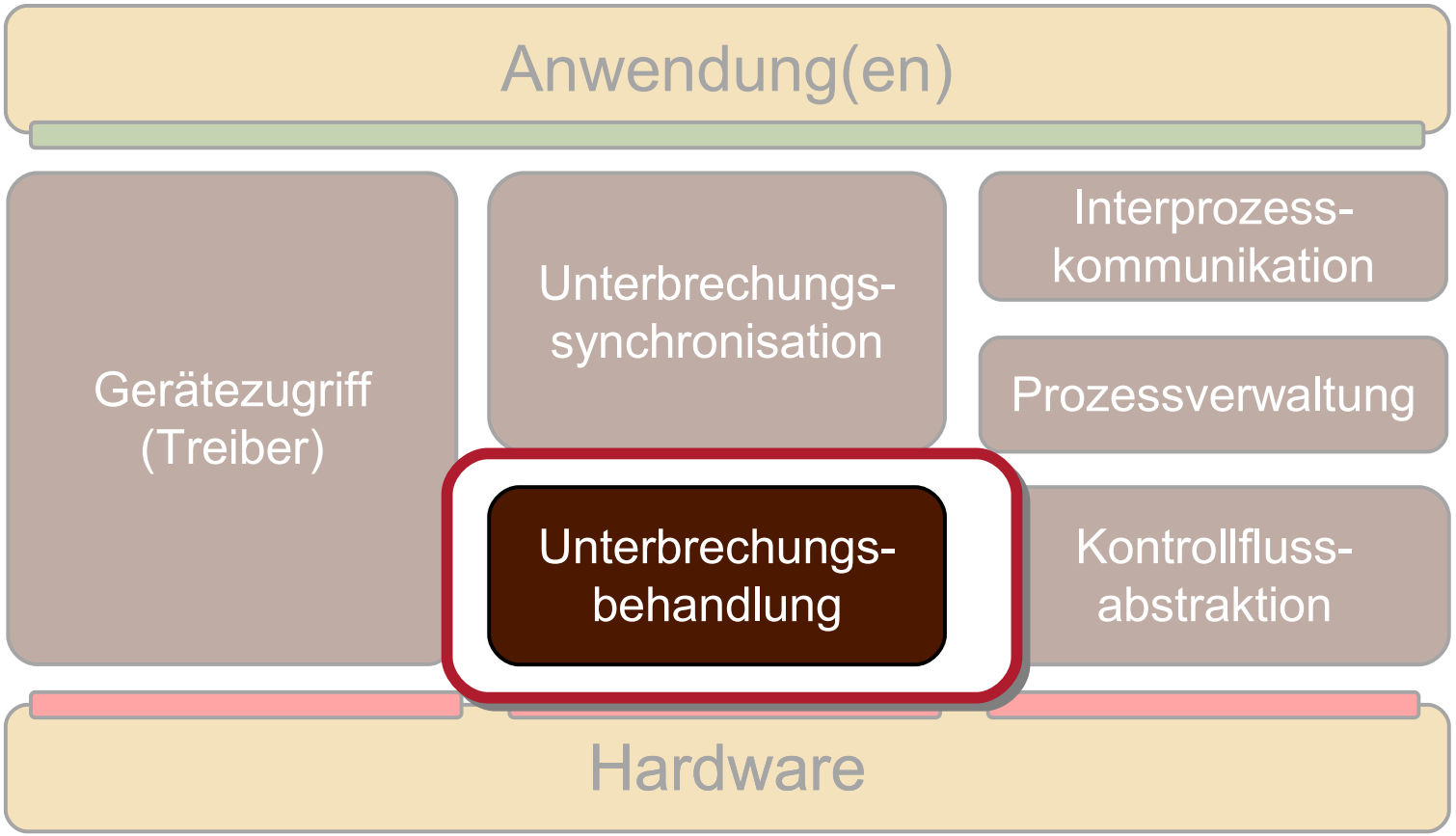
Lehrstuhl für Informatik 4
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen Nürnberg

WS 19 – 13. November 2019

`https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS19/V_BS`

# Überblick: Einordnung dieser VL




Betriebssystementwicklung

# Agenda

Einordnung
Beispiele
Aufteilung Interrupt-Bearbeitung
SoftIRQs
SoftIRQ-Beispiel
Verwandte Konzepte
Zusammenfassung

# Agenda



# Beispiel Console

## Was passiert beim Tippen eines Zeichens in der Console?

1. Benutzer tippt Taste.
2. Keyboard-Controller signalisiert Interrupt.
3. CPU liest Key-Code aus.
4. CPU übersetzt Key-Code in ASCII-Zeichen.
5. ASCII-Zeichen wird im Eingabe-Puffer abgelegt.
6. Wenn „ECHO”-Modus eingeschaltet ist, wird Zeichen auf Bildschirm dargestellt (evntl. Scrollen, Cursor verschieben, Pixel gemäß Zeichensatz setzen/löschen).
7. Die CPU weckt ggf. einen wartenden Prozess auf.

# Beispiel Netzwerk

## Was passiert beim Empfang einer Ethernet-TCP-Nachricht?

1. Eine Netzwerk-Karte empfängt das Ethernet-Paket.
2. Die Netzwerk-Karte signalisiert einen Interrupt.
3. Die CPU leitet das Paket z.B. an die IP-Schicht weiter.
4. CPU überprüft die IP-Check-Summe.
5. In der IP-Schicht werden ggf. mehrere IP-Pakete zu einem Gesamt-Paket zusammengesetzt.
6. Die CPU leitet das Paket z.B. an die TCP-Schicht weiter.
7. In der TCP-Schicht werden z.B. ACK-Nachrichten generiert.
8. Die Daten werden in die Warteschlange des entsprechenden Ports eingehängt.
9. Die CPU weckt ggf. einen wartenden Prozess auf.

# Beispiel NFS-Server

## Was passiert, wenn NFS-Client beim Server Daten anfordert?

1. IP-Nachrichtenempfang s.o.
2. IP-Nachricht wird in die UDP-Schicht weitergeleitet.
3. Gemäß dem Auftrag im Paket werden z.B. von Platte Daten gelesen.
4. Daten und Ziel-/Empfänger-Adresse werden in ein neues UDP-Paket kopiert.
5. UDP-Paket wird in IP-Schicht weitergeleitet.
6. IP-Paket wird ggf. in mehrere kleinere IP-Paket zerteilt.
7. Für jedes Paket wird eine Check-Summe erstellt.
8. Alle IP-Pakete werden in die Ethernet-Schicht weitergeleitet.
9. Netzwerk-Karte verschickt die Ethernet-Pakete.

# Hardware-Unterbrechungen

## Probleme:

- Während der ganzen Unterbrechungslaufzeit sind alle weiteren bzw. alle niederprioren Unterbrechungen gesperrt.
  - Gefahr von großer Interrupt-Verzögerung
  - Gefahr von Datenverlusten
- Unterbrechungsbehandlung kann nicht passiv warten.
  - Interrupts sind gesperrt

# Agenda



# Beispiel Console

Was passiert beim Tippen eines Zeichens in der Console?

1. Benutzer tippt Taste.
2. Keyboard-Controller signalisiert Interrupt.
3. CPU liest Key-Code aus.

   <= Hardware-IRQ abgearbeitet!
4. CPU übersetzt Key-Code in ASCII-Zeichen.
5. ...

   Nach Punkt 3 könnten IRQs wieder erlaubt werden!

# Aufteilung Unterbrechungsbehandlung

## Unterbrechungsbehandlung zweigeteilt:

1. Teil, der Zeichen/Pakete/... bei der Hardware ausliest und in einen Puffer kopiert.
   - Interagiert nur minimal mit dem Rest des Systems.
   - Kann (fast) immer ablaufen.
2. Teil, der Zeichen/Pakete/... aus Puffer ausliest und weiterverarbeitet.
   - Ist weitgehend Hardware-unabhängig.
   - Kann (fast) immer unterbrochen werden.

# Aufteilung Unterbrechungsbehandlung

## Unterbrechungsbehandlung zweigeteilt:

1. Teil ggf. leer

Beispiel: Timer/Uhr-Interrupt

(Typisch: alle „Edge-Triggered”-Interrupts)

# Aufteilung Unterbrechungsbehandlung

## Multiprozessoren:

- 1. und 2. Teil können auf verschiedenen Kernen ausgeführt werden (Beispiel: E/A-Interrupts; Last-Verteilung).
- 1. und 2. Teil können auf gleichem Kern ausgeführt werden (Beispiel: Schedule-Interrupt).

# Beispiel

```
void keyboard_hard_irq() {
        uint8_t code = read_code_from_keyboard_controller();
        if (count < sizeof(buffer)) {
                buffer[head] = code;
                head = (head + 1) % sizeof(buffer);
                count++;
        }
}

void keyboard_soft_irq() {
        asm volatile ("cli\n");
        uint8_t code = buffer[tail];
        tail = (tail + 1) % sizeof(buffer);
        count--;
        asm volatile ("sti\n");
        ...
}

void keyboard_irq() {
        keyboard_hard_irq();
        asm volatile ("sti\n");
        keyboard_soft_irq();
}
```

# Beispiel

```
void keybo
        keyboard_hard_irq();
        asm volatile ("sti\n");
        keyboard_soft_irq();
}
```

Funktioniert so eventuell nicht!

- Problem: nach `sti` kann Stack überlaufen!
- Daher (ähnlich Linux):

```
void keyboard_irq() {
        keyboard_hard_irq();
        apic_disable_keyboard_irq();
        asm volatile ("sti\n");
        keyboard_soft_irq();
        asm volatile ("cli\n");
        apic_enable_keyboard_irq();
}
```

# SoftIRQs

```
apic_enable_keyboard_irq();
```

```
apic_disable_keyboard_irq();
```

können ggf. alle Interrupts nierigerer Priorität ein- bzw. ausschalten.

=> selbstdefinierte Interrupt-Prioritäten

# Aufteilung Unterbrechungsbehandlung

## Nachteile:

- Schreiben in / Lesen aus Puffer kostet Zeit.
- Disable/Enable von Interrupts kostet Zeit.

## Vorteil:

- Andere(!), ggf. wichtige(!), Interrupts werden früher bearbeitet.

# Shared Interrupts

Im Falle von „shared interrupts” sollten

- erst von allen beteiligten Geräten ggf. Daten ausgelesen und zwischengespeichert,
- dann Interrupts wieder zugelassen,
- dann von allen beteiligten Geräten die zwischengespeicherten Daten weiterverarbeitet werden

# Agenda



# SoftIRQs

Hinweis: `keyboard_soft_irq` muss ggf. gar nicht aufgerufen werden:

- Eine Taste wurde losgelassen.
- Eine Shift/Alt/Ctrl/...-Taste wurde gedrückt.

Daher könnte `keyboard_hard_irq`-Methode Bit setzen, wenn `keyboard_soft_irq`-Methode ausgeführt werden soll.

=> Entspricht einem Interrupt-Mechanismus
(diesmal in Software)
sogenannte „**SoftIRQs**”

# SoftIRQ-Interface

## Typisches SoftIRQ-Interface (pro SoftIRQ):

`configure:` Registriere Behandlungsfunktion, die beim Auftreten des SoftIRQs aufgerufen werden soll.

`trigger:` Wenn SoftIRQ disabled: setze Pending-Bit, sonst: führe Behandlungsfunktion aus.

`disable:` Disable SoftIRQ.

`enable:` Enable SoftIRQ. Wenn Pending-Bit gesetzt, führe Behandlungsfunktion aus.

# SoftIRQ-Interface

## Vorsicht! Race-Condition:

```
void disable() {
        enabled = false;
}

void enable() {
        while (pending) {
                pending = false;
                handler();
        }

        enabled = true;
}

void trigger() {
        if (enabled) {
                asm volatile ("sti\n");
                handler();
                asm volatile ("cli\n");
        } else {
                pending = true;
        }
}
```

<= trigger hat keinen Effekt!

# SoftIRQ-Interface

`trigger` wird nur im Interrupt-Handler aufgerufen.
Kann daher mit `cli`/`sti` hart synchronisiert werden:

```
void enable() {
        asm volatile("cli\n");
        while (pending) {
                pending = false;
                asm volatile("sti\n");
                handler();
                asm volatile("cli\n");
        }
        enabled = true;
        asm volatile("sti\n");
}
```

# SoftIRQ-Interface

Idee: *BSD: `trigger` wird nur im Interrupt-Handler aufgerufen und kennt damit gesicherten Instruktion-Pointer (IP).

```
void enable() {
        asm volatile("enable_begin:\n");
        while (pending) {
                pending = false;
                handler();
        }
        enabled = true;
        asm volatile("enable_end:\n");
}

void trigger() {
        if (enabled) {
                asm volatile("sti\n");
                handler();
                asm volatile("cli\n");
        } else {
                pending = 1;
                if (enable_begin <= IP && IP <= enable_end) {
                        IP = enable_begin;
                }
        }
}
```

# SoftIRQ-Interface

Hardware-IRQs werden beim Signalisieren eines Interrupts von der Hardware aus nur dann gestartet, wenn sie nicht schon laufen.

Kann durch weiteres Flag (`running`) nachgebildet werden.

# Agenda



# SoftIRQ-Beispiel

```
void keyboard_hard_irq() {
        uint8_t code = read_code_from_keyboard_controller();
        if (count < sizeof(buffer)) {
                buffer[head] = code;
                head = (head + 1) % sizeof(buffer);
                count++;
        }
        apic_disable_keyboard_irq();
        trigger();
        apic_enable_keyboard_irq();
}

void keyboard_soft_irq() {
        asm volatile ("cli\n");
        while (0 < count) {
                uint8_t code = buffer[tail];
                tail = (tail + 1) % sizeof(buffer);
                count--;
                asm volatile ("sti\n");
                print_to_screen(code);
                asm volatile ("cli\n");
        }
        asm volatile ("sti\n");
}
```

# SoftIRQ-Beispiel

```
void keyboard_soft_irq() {
        asm volatile ("cli\n");
        while (0 < count) {
                uint8_t code = buffer[tail];
                tail = (tail + 1) % sizeof(buffer);
                count--;
                asm volatile ("sti\n");
                print_to_screen(code);
                asm volatile ("cli\n");
        }
        asm volatile ("sti\n");
}

void console_write(char code) {
        disable();
        print_to_screen(code);
        enable();
}
```

# Agenda



# Verwandte Konzepte – Top/Bottom Halves

Idee:

- Interrupt-Handler liest Daten aus Gerät in Puffer und setzt Bit
- vor Rückkehr in den User-Mode werden Puffer ausgelesen und die Daten verarbeitet, wenn Bit gesetzt

(Linux)

# Verwandte Konzepte – ksoftirqd

Idee:

- `while (pending) { pending = false; handler(); }`-Schleife wird nur begrenzte Anzahl von Malen durchlaufen.
- Danach wird „ksoftirqd” (Kernel-Thread) aufgeweckt, der SoftIRQ-Abarbeitung übernimmt.

Vorteil: Interrupts können CPUs nicht monopolisieren. (Linux)

# Verwandte Konzepte – tasklets

Idee:
Hard-Interrupt-Handler triggert nicht (per Nummer) die Ausführung einer bestimmten Methode,
sondern fügt eine beliebige Methode in eine Liste ein.
Liste wird dann vor Rückkehr in User-Mode abgearbeitet.
(Linux)

# Verwandte Konzepte – Interrupt Threads

Idee:

- Interrupt-Handler liest Daten aus Gerät in Puffer
- weckt Thread auf
- Thread liest Puffer aus und ...

Threads können Prioritäten besitzen.
Threads können warten.

# Verwandte Konzepte – Interrupt Workqueues

Idee:

- Interrupt-Handler fügen Aufträge in Work-Queue ein.
- Work-Queue wird von Worker-Thread-Pool abgearbeitet.

# Agenda



# Zusammenfassung

- Viele verschiedene Möglichkeiten, Interrupts abzuarbeiten.
- Immer Ziel: schnelle Reaktion auf (wichtige) Interrupts.
- Fast immer: „Hard”- und „Soft”-Interrupt-Teil.
- SoftIRQs: „Interrupts” in Software.
- In aktuellen BS existieren weitere, von SoftIRQs abgeleitete Konzepte.