Betriebssysteme (BS)

VL 4.2 – Unterbrechungen, Software – Zustand

Volkmar Sieh / Daniel Lohmann

Lehrstuhl für Informatik 4
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen Nürnberg

WS 21 – 15. November 2021

https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS21/V_BS

Agenda

Einordnung
Begriffe und Grundannahmen
Zustandssicherung
Zustandsänderungen
Zusammenfassung

Zustandssicherung

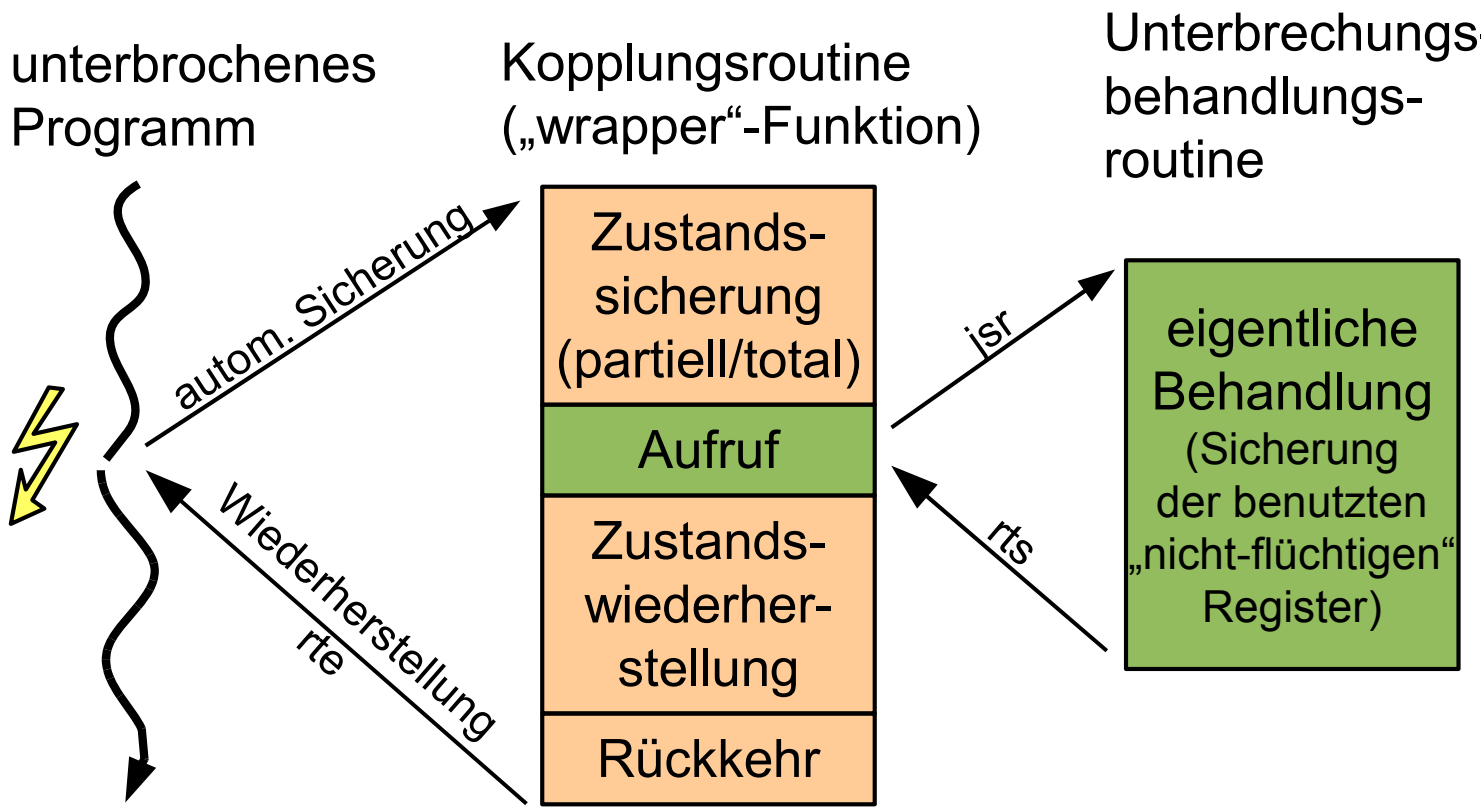
- der Zustand eines Rechners ist enorm groß
  - alle Prozessorregister
    - Instruktionszeiger, Stapelzeiger, Vielzweckregister, Statusregister, ...
  - der komplette Hauptspeicherinhalt, Caches
  - der Inhalt von E/A-Registern bzw. *Ports*, Festplatteninhalte, ...
- jeglicher benutzter Zustand, dessen asynchrone Änderung das unterbrochene Programm nicht erwartet, ...
  - darf während der Unterbrechungsbehandlung nicht modifiziert werden
  - muss gesichert und später wiederhergestellt werden
- die CPU sichert (je nach Typ) automatisch ...
  - minimal wenige Bytes (nur Instruktionszeiger und Statusregister)
  - alle Register

Zustandssicherungskonzepte

- **totale Sicherung**
  - die Behandlungsroutine sichert alle Register, die nicht automatisch gesichert wurden
  - Nachteil: eventuell wird zu viel gesichert
  - Vorteil: gesicherter Zustand leicht „zugreifbar“
- **partielle Sicherung**
  - die Behandlungsroutine sichert nur die Register, die im weiteren Verlauf geändert werden bzw. nicht gesichert und wieder hergestellt werden
  - machbar, wenn die eigentliche Behandlung in einer Hochsprache wie C oder C++ implementiert ist
  - Vorteile:
    - nur veränderter Zustand wird auch gesichert
    - evtl. weniger Instruktionen zum Sichern und Wiederherstellen nötig
  - Nachteil: gesicherter Zustand „verstreut“

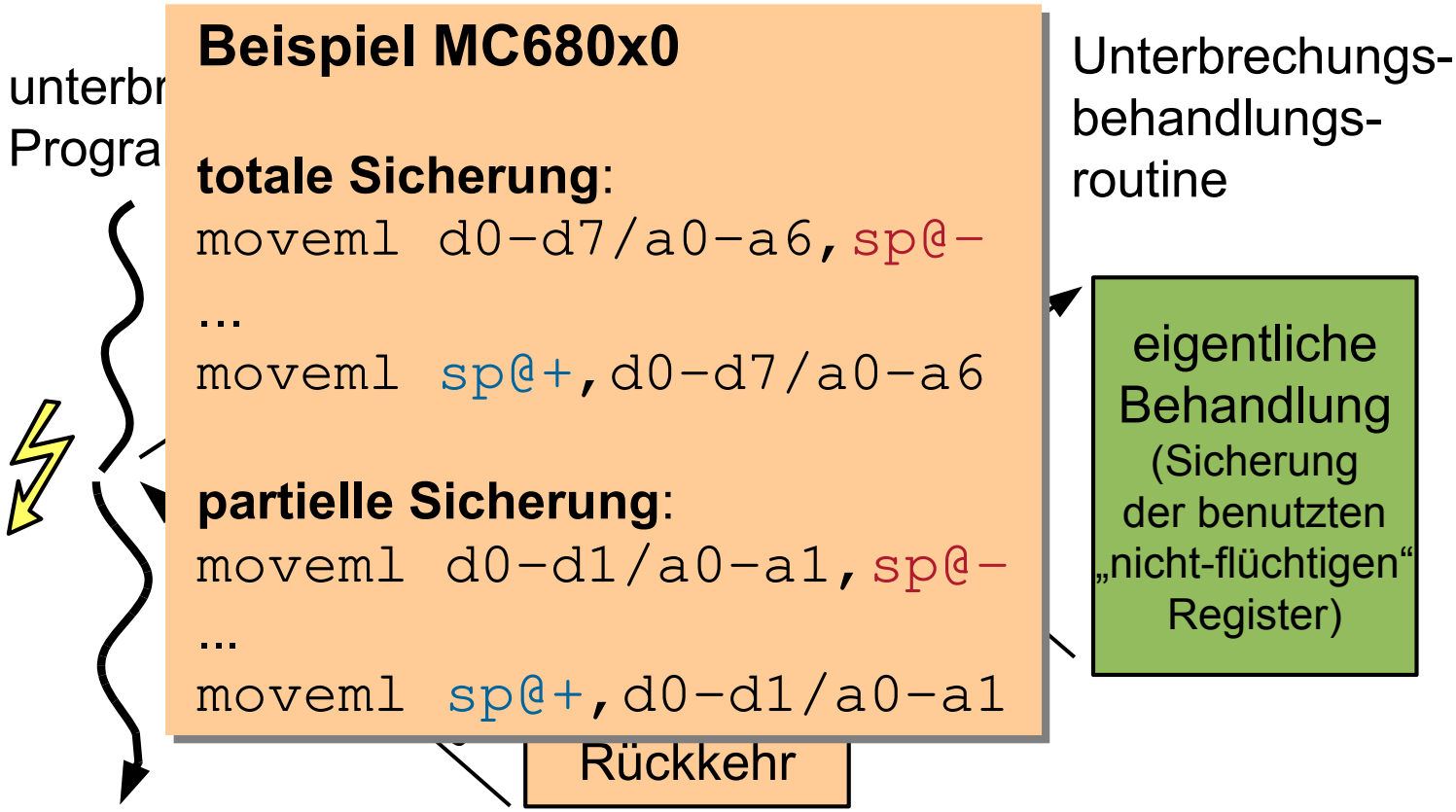
Übergang auf die Hochsprachenebene

- nicht-portabler Maschinencode sollte minimiert werden
- die eigentliche Unterbrechungsbehandlung erfolgt in einer Hochsprachenfunktion



Übergang auf die Hochsprachenebene

- nicht-portabler Maschinencode sollte minimiert werden
- die eigentliche Unterbrechungsbehandlung erfolgt in einer Hochsprachenfunktion



Flüchtige und nicht-flüchtige Register

- eine Aufteilung, die **der (C/C++) Übersetzer** vornimmt
  - **nicht-flüchtig**
    - der Übersetzer garantiert, dass der Wert dieser Register über Funktionsaufrufe hinweg erhalten bleibt
    - ggf. in der aufgerufenen Funktion gesichert und wiederhergestellt
  - **flüchtig** (engl. *scratch registers*)
    - wenn die aufrufende Funktion den Wert auch nach dem Aufruf noch benötigt, muss das Register selbst (beim Aufrufer) gesichert werden
    - normalerweise für Zwischenergebnisse verwendet
- üblicherweise gibt es jedoch einen Standard
  - an den sich alle Übersetzer halten
  - Beispiel x86:
    - `eax`, `ecx`, `edx` und `eflags` gelten als flüchtig

Wiederherstellung

- die Kopplungsroutine muss alle gesicherten Registerinhalte am Ende wieder laden
  - ... und dann nicht mehr verändern!
- mit einer speziellen Instruktion (z.B. `rte` oder `iret`) wird der vorherige Zustand wiederhergestellt
  - Lesen des automatisch gesicherten Zustands von *Supervisor-Stack*
  - Setzen des gesicherten Arbeitsmodus (Benutzer-/Systemmodus) und Sprung an die gesicherte Adresse

Das BS kann den Zustand auch vor dem `rte`/`iret` ändern. Dies wird gerne ausgenutzt, um BS-Code im Benutzermodus auszuführen.

Agenda

- Einordnung
- Begriffe und Grundannahmen
- Zustandssicherung
- Zustandsänderungen
  - Beispiele
  - Problemanalyse
  - Lösungsansätze
- Zusammenfassung

Zustandsänderungen ...

- sind Sinn und Zweck der Unterbrechungsbehandlung
  - Gerätetreiber müssen über den Abschluss einer E/A Operation informiert werden
  - der Scheduler muss erfahren, dass eine Zeitscheibe abgelaufen ist
- müssen mit Vorsicht durchgeführt werden
  - Unterbrechungen können zu jeder Zeit auftreten
  - kritisch sind Daten/Datenstrukturen, die der normale Kontrollfluss und die Unterbrechungsbehandlung sich teilen

Beispiel 1: Systemzeit

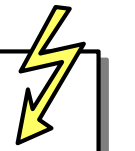
- per Zeitgeberunterbrechung wird die globale Systemzeit inkrementiert
  - z.B. einmal pro Sekunde
- mit Hilfe einer Betriebssystemfunktion `time()` kann die Systemzeit abgefragt werden

```
/* globale Zeitvariable */
extern volatile time_t global_time;
```

```
/* Systemzeit abfragen */

time_t time () {
  return global_time;
}
```

```
/* Unterbrechungs- *
 * behandlung      */
void timerHandler () {
  global_time++;
}
```



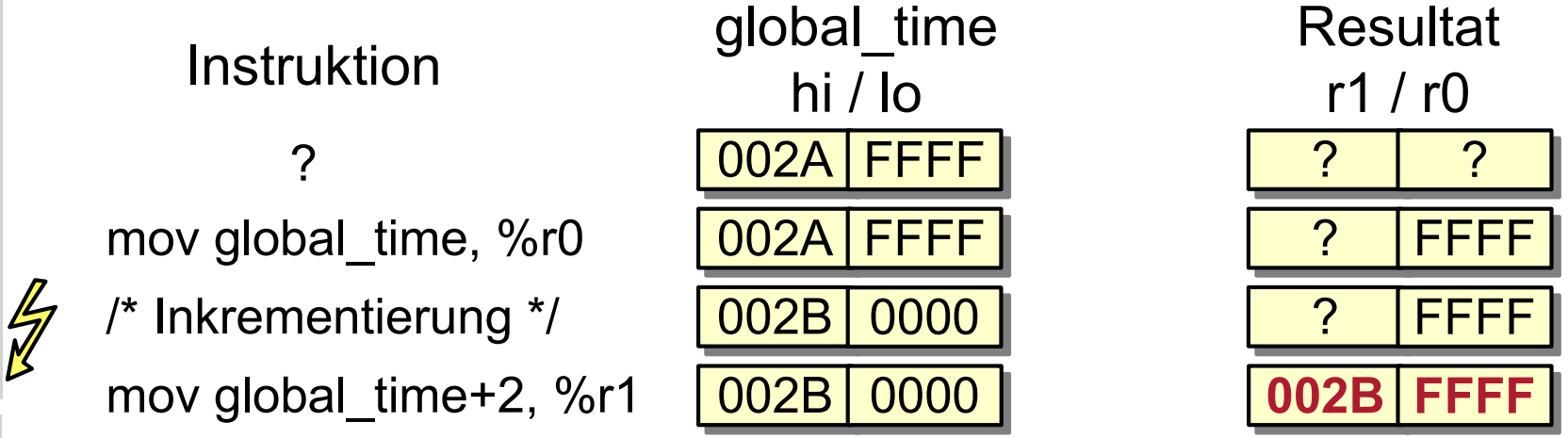
Beispiel 1: Systemzeit

- hier schlummert möglicherweise ein Fehler ...
  - das Lesen von global_time erfolgt nicht notwendigerweise atomar!

```
32-Bit-CPU:
mov global_time, %eax
```

```
16-Bit-CPU (little endian):
mov global_time, %r0; lo
mov global_time+2, %r1; hi
```

- kritisch ist eine Unterbrechung zwischen den beiden Leseinstruktionen bei der 16-Bit-CPU



Beispiel 1: Systemzeit

- hier schlummert möglicherweise ein Fehler ...
  - das Lesen von global_time erfolgt nicht notwendigerweise atomar!

```
32 Bit C                                  le endian):
mov glob                                   %r0; lo
                                          -2, %r1; hi
```

Problem:

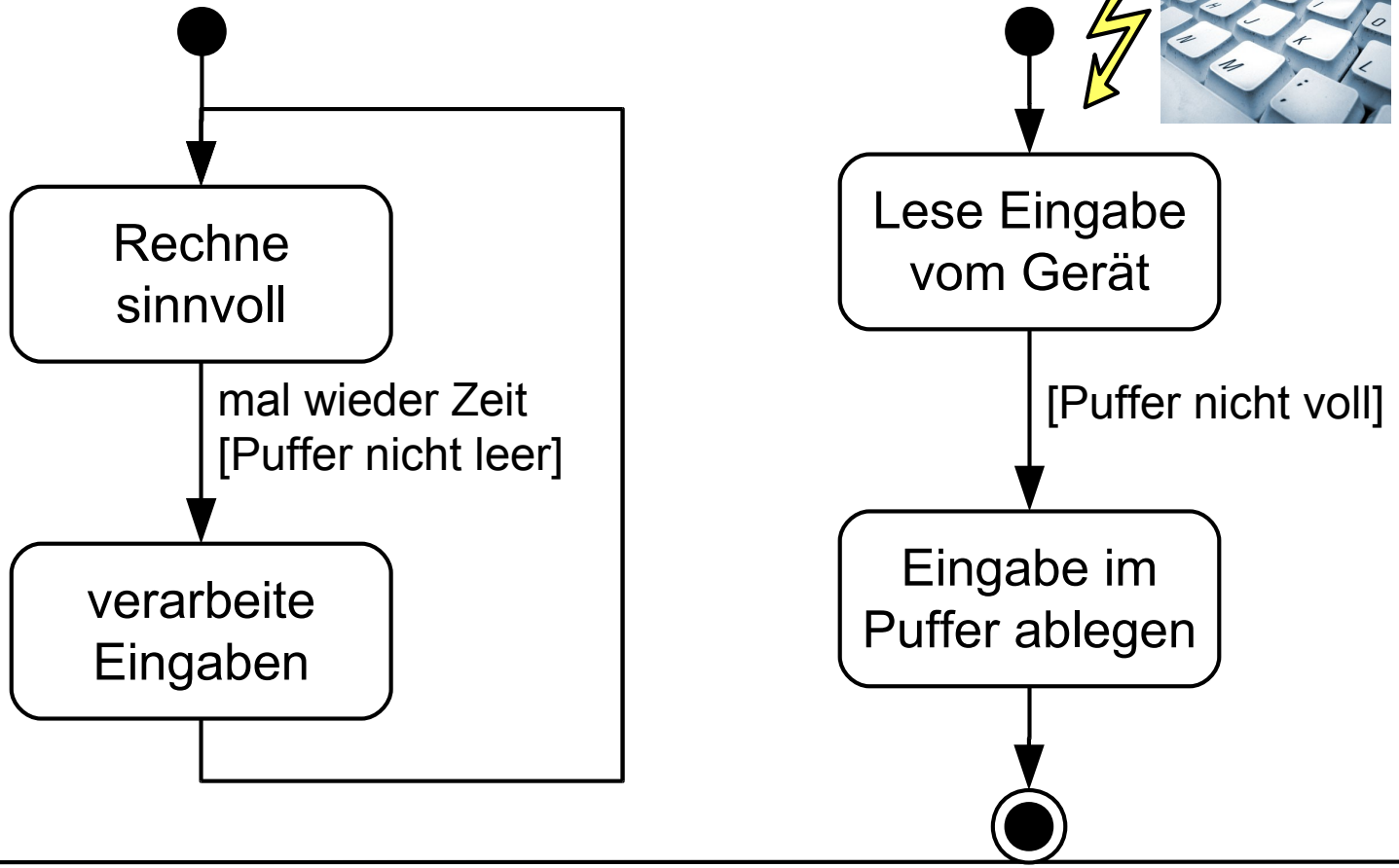
Alle 18,2 Stunden kann die Systemzeit (kurz) um etwa die gleiche Zeit vorgehen. Leider ist das Problem nicht verlässlich reproduzierbar.

- kritisch ist eine Unterbrechung zwischen den beiden Leseinstruktionen bei der 16 Bit CPU

Instruktion	global_time hi	global_time lo	Resultat r1	Resultat r0
?	002A	FFFF	?	?
mov global_time, %r0	002A	FFFF	?	FFFF
/* Inkrementierung */	002B	0000	?	FFFF
mov global_time+2, %r1	002B	0000	**002B**	**FFFF**

Beispiel 2: Ringpuffer

- Unterbrechungen wurden eingeführt, damit das System **nicht aktiv** auf Eingaben warten muss
  - während gerechnet wird, kann die Unterbrechungsbehandlung Eingaben in einem Puffer ablegen

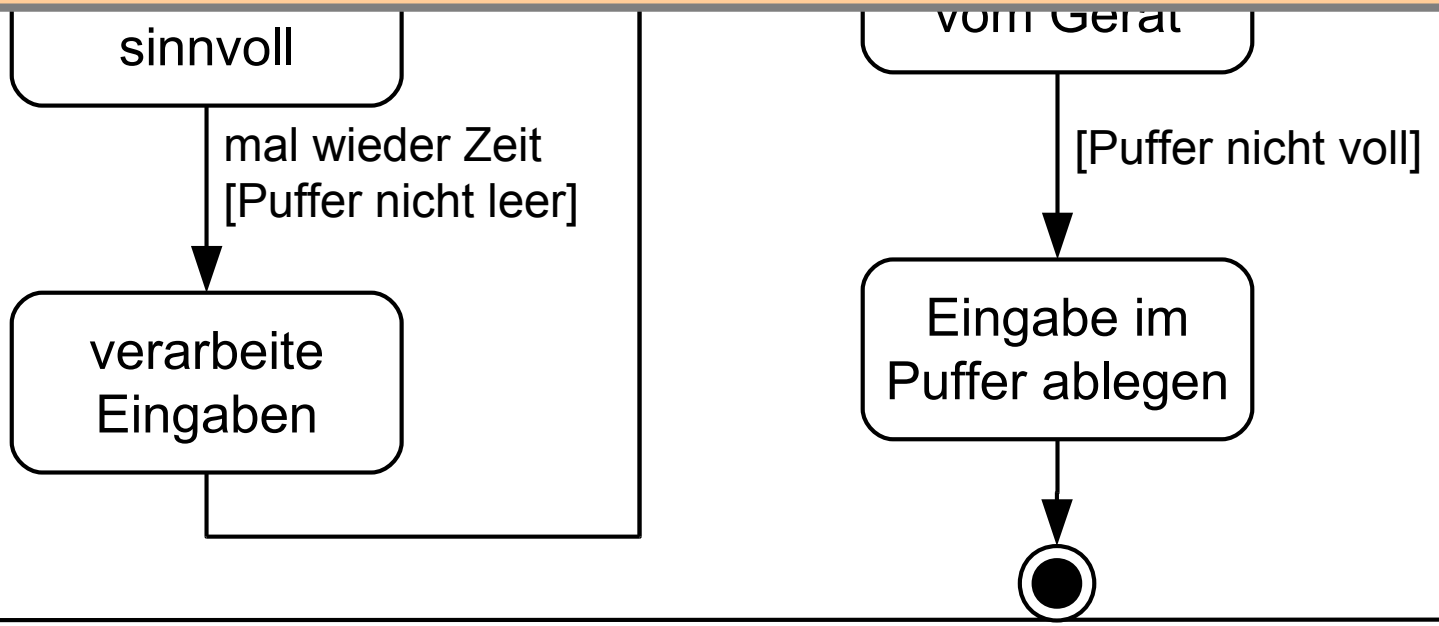


Beispiel 2: Ringpuffer

- Unterbrechungen wurden eingeführt, damit das System **nicht aktiv** auf Eingaben warten muss
  - wäh… …dlung Ein…

Problem:

Wenn die Eingabe nicht schnell genug verarbeitet werden, kann der Puffer voll werden. Die Behandlungsroutine kann die Eingabe dann nicht im Puffer ablegen. In diesem Fall geht die Eingabe verloren.



Beispiel 2: Ringpuffer

auch die Pufferimplementierung ist kritisch ...

```
// Pufferklasse in C++
class BoundedBuffer {
  char buf[SIZE]; int occupied; int nextin, nextout;
public:
  BoundedBuffer(): occupied(0), nextin(0), nextout(0) {}
  void produce(char data) {          // Unterbrechungsbehandlung:
    int elements = occupied;         // Elementzähler merken
    if (elements == SIZE) return;    // Element verloren
    buf[nextin] = data;              // Element schreiben
    nextin++; nextin %= SIZE;        // Zeiger weitersetzen
    occupied = elements + 1;         // Zähler erhöhen
  }
  char consume() {                   // normaler Kontrollfluss:
    int elements = occupied;         // Elementzähler merken
    if (elements == 0) return 0;     // Puffer leer, kein Ergebnis
    char result = buf[nextout];      // Element lesen
    nextout++; nextout %= SIZE;      // Lesezeiger weitersetzen
    occupied = elements - 1;         // Zähler erniedrigen
    return result;                   // Ergebnis zurückliefern
} };
```

Beispiel 2: Ringpuffer

auch die Pufferimplementierung ist kritisch ...

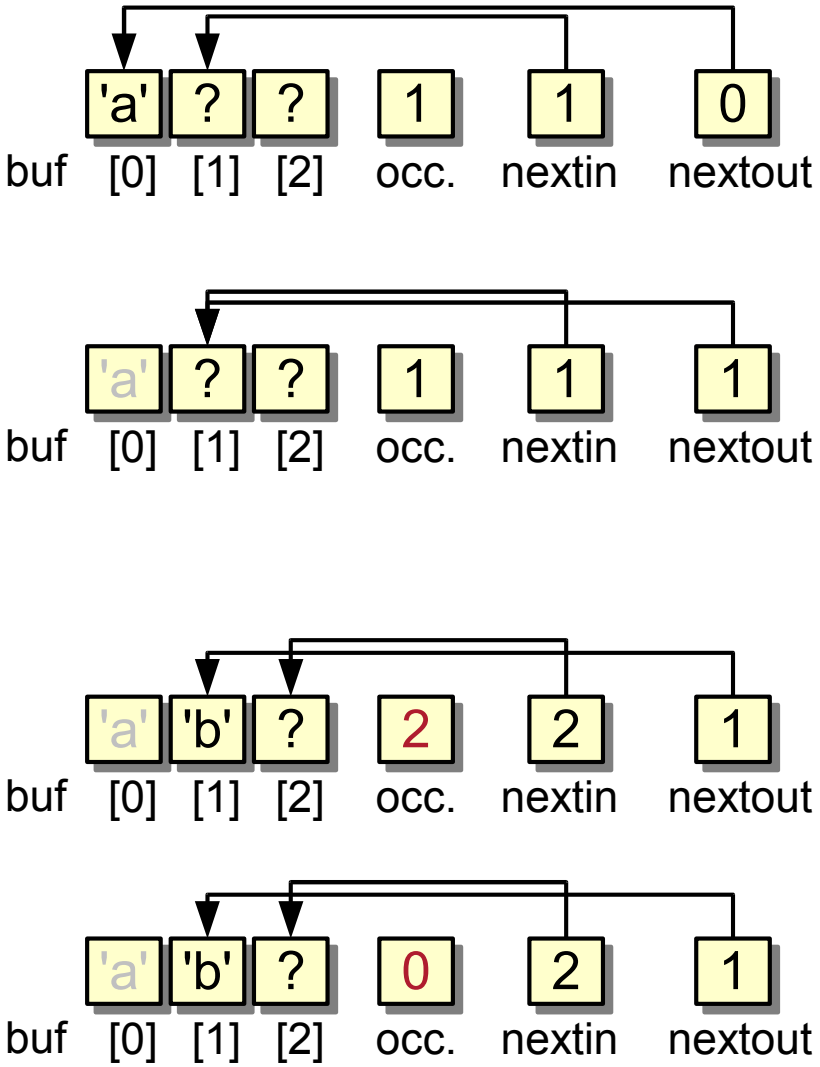
Ausführung

Zustand

```
char consume() {
  int elements = occupied; // 1
  if (elements == 0) return 0;
  char result = buf[nextout]; //'a'
  nextout++; nextout %= SIZE;

void produce(char data) { // 'b'
  int elements = occupied; // 1!
  if (elements == SIZE) return;
  buf[nextin] = data;
  nextin++; nextin %= SIZE;
  occupied = elements + 1; // 2
}

  occupied = elements - 1; // 0
  return result; // 'a'
}
```



Beispiel 2: Ringpuffer

auch die Pufferimplementierung ist kritisch ...

Ausführung

Zustand ⟹

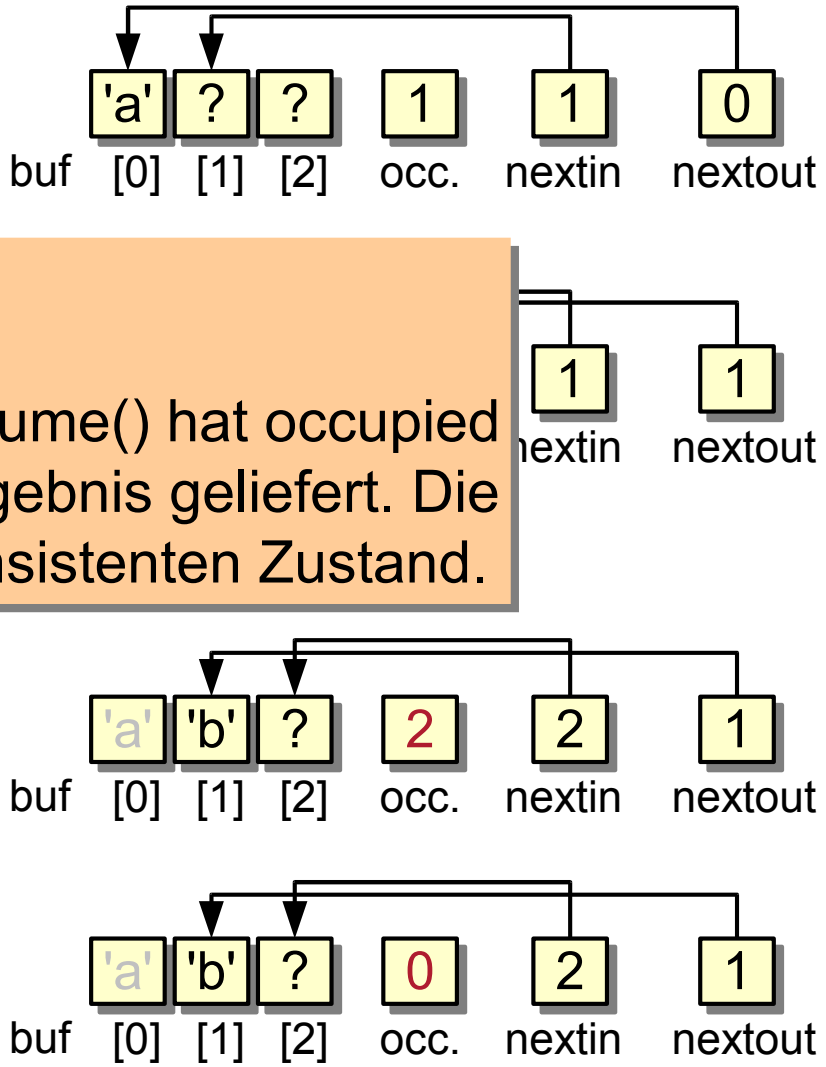
```
char consume() {
  int e
  if (e
  char
  nexto

void pr
  int e
  if (elements == SIZE) return;
  buf[nextin] = data;
  nextin++; nextin %= SIZE;
  occupied = elements + 1; // 2
}

  occupied = elements - 1; // 0
  return result; // 'a'
}
```

Problem:

Beim nächsten Aufruf von consume() hat occupied den Wert 0. Damit wird kein Ergebnis geliefert. Die Datenstruktur ist in einem inkonsistenten Zustand.



Zustandsänderung: Analyse

- selbst einzelne Zuweisungen müssen nicht atomar sein
  - Abhängigkeit vom CPU-Typ, Übersetzer und Codeoptimierung
- Pufferspeicher ist endlich
  - Behandlungsroutine kann nicht warten
  - Daten können verloren gehen
- Pufferdatenstruktur kann kaputt gehen aufgrund von ...
  - inkonsistenten Zwischenzuständen bei Änderungen durch den normalen Kontrollfluss
  - Zustandsänderungen während des Lesens (inkonsistente Kopie!)
  - Änderungen mit Hilfe einer Kopie, die nicht mehr dem Original entspricht
- das Problem ist nicht symmetrisch
  - der normale Kontrollfluss „unterbricht“ nicht die Unterbrechungsbehandlung
  - kann ausgenutzt werden!

„Harte“ Synchronisation

- Durch Unterdrückung von Unterbrechungen können *race conditions* vermieden werden:

```
char consume() {                        // normaler Kontrollfluss:
  disable_interrupts();                 // Unterbrechungen verbieten
  int elements = occupied;              // Elementzähler merken
  if (elements == 0) {                  // Puffer leer, kein Ergebnis
    enable_interrupts();                // Unterbrechungen zulassen
    return 0;
  }
  char result = buf[nextout];           // Element lesen
  nextout++; nextout %= SIZE;           // Lesezeiger weitersetzen
  occupied = elements - 1;              // Zähler erniedrigen
  enable_interrupts();                  // Unterbrechungen zulassen
  return result;                        // Ergebnis zurückliefern
}
```

- Probleme:
  - Gefahr des Verlusts von Unterbrechungsanforderungen
  - hohe und schwer vorherzusagende **„Unterbrechungslatenzen“**

Weitere Techniken in der nächsten VL

- „schlaue“ (optimistische) Verfahren
  - Datenstruktur geschickt wählen
    - möglichst wenige geteilte Elemente
    - mit weichen Konsistenzbedingungen arbeiten
  - optimistisch herangehen
    - i.d.R. tritt keine Unterbrechung im kritischen Abschnitt auf
    - falls doch, wird der Schaden festgestellt und repariert
    - ggf. wird die Operation auch wiederholt
- Pro-/Epilogmodell
  - Aufteilung der Unterbrechungsbehandlung in zwei Phasen
    - der kritische Teil wird durch einen Softwaremechanismus verzögert
    - schnelle Reaktion weiterhin möglich

Agenda

Einordnung
Begriffe und Grundannahmen
Zustandssicherung
Zustandsänderungen
Zusammenfassung

Zusammenfassung

- die korrekte Behandlung von Unterbrechungen gehört zu den schwierigsten Aufgaben im Betriebssystembau
  - Quelle der Asynchronität
    - gleichzeitig Segen und Fluch
  - Zustandssicherung auf Registerebene
    - Assemblerprogrammierung!
    - Abhängigkeit vom Übersetzer (z.B. flüchtige/nicht-flüchtige Register)
  - unterschiedliche Modelle (Prioritäten, u.s.w.)
- Zustandsänderungen in der Unterbrechungsbehandlung müssen wohl überlegt sein
  - kritische Abschnitte schützen
  - Fehler schwer zu finden (nicht verlässlich reproduzierbar!)