J Mikrocontroller-Programmierung

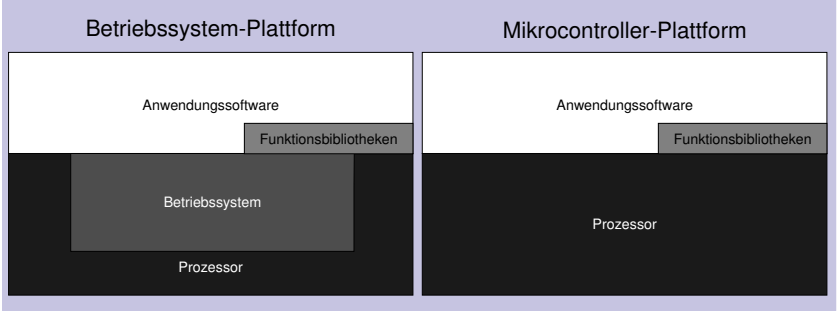
J.1 Überblick

- Mikrocontroller im Gegensatz zu Betriebssystem-Plattform
  - ➤ Prozessor am Beispiel AVR-Mikrocontroller
  - ➤ Speicher
  - ➤ Peripherie
- Programmausführung
  - ➤ Programm laden
  - ➤ starten
  - ➤ Fehler zur Laufzeit
- Interrupts
  - ➤ Grundkonzepte
  - ➤ Nebenläufigkeit
  - ➤ Umgang mit Nebenläufigkeit

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

J.2 Mikrocontroller vs. Betriebssystem-Plattform

- Entscheidende Unterschiede:
  - ◆ Betriebssystem-Unterstützung entfällt



  - ◆ Prozessor bietet in der Regel weniger / andere Funktionalität
    - ➤ kein virtueller Speicher
    - ➤ kein Speicherschutz
    - ➤ einfachere Peripherie-Ansteuerung

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

1 Betriebssystemunterstützung

- Prozesse als Ausführungsumgebung für Programme
  - ◆ Erzeugen von Prozessen, Starten von Programmen
  - ◆ Ausführung mehrerer Prozesse quasi-gleichzeitig
  - ◆ Überwachung der Prozesse (z. B. beim Speicherzugriff), notfalls Abbrechen
- Dateisystem zur Abstraktion von Speichermedien und Peripheriegeräten
  - ◆ Abwicklung der Interaktion mit der Peripherie
    - ➤ Ansteuerung der Controller
    - ➤ Bearbeitung von Interrupts
  - ◆ Bereitstellen einer einheitlichen Schnittstelle (read/write) für Anwendungsprogramme
- Mechanismen zur Kommunikation zwischen Prozessen
  - ◆ gemeinsame Speicherbereiche
  - ◆ Nachrichtenaustausch
  - ◆ Signale

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

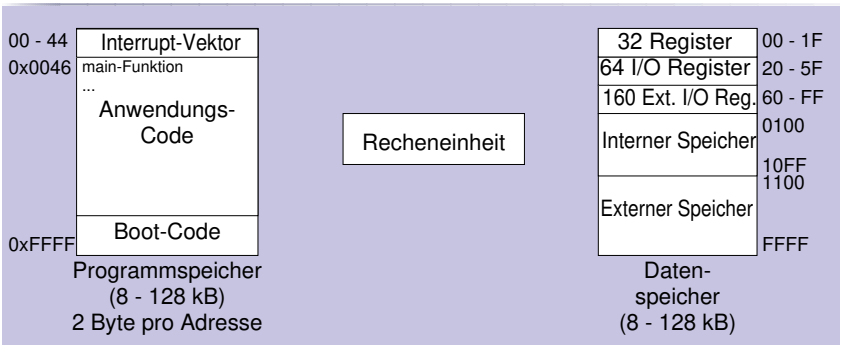
2 Mikrocontroller-Umgebung

- Programm läuft "nackt" auf der Hardware
  - ➥ Compiler und Binder müssen bereits ein vollständiges Programm erzeugen
    - ➤ kein dynamisches Binden zur Ladezeit
    - ➤ keine Betriebssystemunterstützung zur Laufzeit
  - ◆ Funktionalität muss entweder vom Anwender programmiert werden oder in Form von Funktionsbibliotheken zum Programm dazugebunden werden
  - ◆ Umgang mit "lästigen Programmierdetails" (z. B. bestimmte Bits setzen) wird durch Makros erleichtert
- Es wird genau ein Programm ausgeführt
  - ➤ Programm kann zur Laufzeit "niemanden stören"
  - ➤ Fehler betreffen nur das Programm selbst
  - ➤ keine Schutzmechanismen notwendig
    - ➥ ABER: Fehler ohne direkte Auswirkung werden leichter übersehen

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

J.3 Beispiel: AVR-Mikrocontroller (ATmega-Serie)

1 Architektur



- Getrennter Speicher für Programm (Flash-Speicher) und Daten (SRAM)
- Register des Prozessors und Register für Ein-/Ausgabe-Schnittstellen sind in Adressbereich des Datenspeichers eingebettet

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

1 Architektur(2)

- Peripherie-Bausteine werden über I/O-Register angesprochen bzw. gesteuert (Befehle werden in den Bits eines I/O-Registers kodiert)
  - ➤ mehrere Timer
    (Zähler, deren Geschwindigkeit einstellbar ist und die bei einem bestimmten Wert einen Interrupt auslösen)
  - ➤ Ports
    (Gruppen von jeweils 8 Anschlüssen, die auf 0V oder V_{cc} gesetzt, bzw. deren Zustand abgefragt werden kann)
  - ➤ Output Compare Modulator (OCM)
    (zur Pulsweitenmodulation)
  - ➤ Serial Peripheral Interface (SPI)
  - ➤ Synchrone/Asynchrone serielle Schnittstelle (USART)
  - ➤ Analog-Comparator
  - ➤ A/D-Wandler
  - ➤ EEPROM
    (zur Speicherung von Konfigurationsdaten)

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2 In Speicher eingebettete Register (memory mapped registers)

- Je nach Prozessor sind Zugriffe auf I/O-Register auf zwei Arten realisiert:
  - ◆ spezielle Befehle (z. B. in, out bei x86)
  - ◆ in den Adressraum eingebettet, Zugriff mittels Speicheroperationen
- Bei den meisten Mikrocontrollern sind die Register in den Speicher eingebettet
- Zugriffe auf die entsprechende Speicherstelle werden auf das entsprechende Register umgeleitet

➥ sehr einfacher und komfortabler Zugriff

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

3 I/O-Ports

- Ein I/O-Port ist eine Gruppe von meist 8 Anschluss-Pins und dient zum Anschluss von digitalen Peripheriegeräten
- Die Pins können entweder als Eingang oder als Ausgang dienen
  - ◆ als Ausgang konfiguriert, kann man festlegen, ob sie eine logische "1" oder eine logische "0" darstellen sollen
    - ➤ Ausgang wird dann entsprechend auf V_{CC} oder GND gesetzt
  - ◆ als Eingang konfiguriert, kann man den Zustand abfragen
- Manche I/O Pins können dazu genutzt werden einen Interrupt (IRQ = Interrupt Request) auszulösen (externe Interrupt-Quelle)
- Die meisten Pins können alternativ eine Spezialfunktion übernehmen, da sie einem integrierten Gerät als Ein- oder Ausgabe dienen können
  - ◆ z. B. dienen die Pins 0 und 1 von Port E (ATmega128) entweder als allgemeine I/O-Ports oder als RxD und TxD der seriellen Schnittstelle

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

4 Programme laden

- generell bei Mikrocontrollern mehrere Möglichkeiten
- ▲ Programm ist schon da (ROM)
- ▲ Bootloader-Programm ist da und liest Anwendung über serielle Schnittstelle ein und speichert sie im Programmspeicher ab
- ▲ spezielle Hardware-Schnittstelle
  - ➤ "jemand anderes" kann auf Speicher zugreifen
  - ➤ Beispiel: JTAG
    spezielle Hardware-Komponente im AVR-Chip, die Zugriff auf die Speicher hat und mit der man über spezielle PINs kommunizieren kann

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

5 Programm starten

- Reset bewirkt Ausführung des Befehls an Adresse 0x0000
  - ➤ dort steht ein Sprungbefehl auf die Speicheradresse der main-Funktion
  - ➤ alternativ: Sprungbefehl auf Adresse des Bootloader-Programms, Bootloader lädt Anwendung und springt dann auf main-Adresse

6 Fehler zur Laufzeit

- Zugriff auf ungültige Adresse
  - ◆ es passiert nichts:
    - ➤ Schreiben geht in's Leere
    - ➤ Lesen ergibt zufälliges Ergebnis
- ungültige Operation auf nur-lesbare / nur-schreibbare Register/Speicher
  - ➤ hat keine Auswirkung

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

J.4 Interrupts

1 Motivation

- An einer Peripherie-Schnittstelle tritt ein Ereignis auf
  - ➤ Spannung wird angelegt
  - ➤ Zähler ist abgelaufen
  - ➤ Gerät hat Aufgabe erledigt (z. B. serielle Schnittstelle hat Byte übertragen, A/D-Wandler hat neuen Wert vorliegen)
  - ➤ Gerät hat Daten für die Anwendung bereit stehen (z. B. serielle Schnittstelle hat Byte empfangen)
- ? wie bekommt das Programm das mit?
  - ➤ Zustand der Schnittstelle regelmäßig überprüfen (= ***Polling***)
  - ➤ Schnittstelle meldet sich von sich aus beim Prozessor und unterbricht den Programmablauf (= ***Interrupt***)

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

1 Motivation (2)

- Polling vs. Interrupts: Vor und Nachteile
  - \+ Pollen erfolgt **synchron** zum Programmablauf,
    Programm ist in dem Moment auf das Ereignis vorbereitet
  - – Interrupts unterbrechen den Programmablauf irgendwo (**asynchron**),
    sie könnten in dem Augenblick stören
    - ➥ durch die Interrupt-Bearbeitungentsteht **Nebenläufigkeit**
  - – Pollen erfolgt explizit im Programm und meistens umsonst — Rechenzeit wird verschwendet
  - \+ Interrupts melden sich nur, wenn tatsächlich etwas zu erledigen ist
  - \+ Interrupt-Bearbeitung ist in einer Funktion kompakt zusammengefasst
  - – Polling-Funktionalität ist in den normalen Pragrammablauf eingestreut — und hat mit der "eigentlichen" Funktionalität dort meist nichts zu tun

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

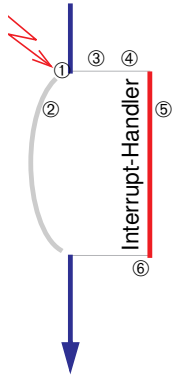
2 Implementierung

- typischerweise mehrere Interrupt-Quellen
- Interrupt-Vektor
  - Speicherbereich (Tabelle), der für jeden Interrupt Informationen zur Bearbeitung enthält
    - ➤ Maschinenbefehl (typischerweise ein Sprungbefehl auf eine Adresse, an der eine Bearbeitungsfunktion steht) oder
    - ➤ Adresse einer Funktion (***Interrupt-Handler***)
  - feste Position im Speicher — ist im Prozessorhandbuch nachzulesen
- Maskieren von Interrupts
  - ➤ Bit im Prozessor-Statusregister schaltet den Empfang aller Interrupts ab
  - ➤ zwischenzeitlich eintreffende Interrupts werden gepuffert (nur einer!)
  - ➤ die Erzeugung einzelner Interrupts kann am jeweiligen Gerät unterbunden werden

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

3 Ablauf

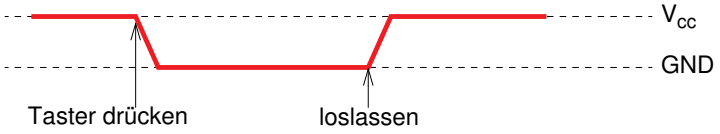
① Gerät löst Interrupt aus, Ablauf des Anwendungsprogramms wird unmittelbar unterbrochen
② weitere Interrupts werden deaktiviert
③ aktuelle Position im Programm und Registerinhalte werden im Datenspeicher gesichert
④ Eintrag im Interrupt-Vektor ermitteln
⑤ Befehl wird ausgeführt bzw. Funktion aufrufen
⑥ am Ende der Bearbeitungsfunktion bewirkt ein Befehl "Return from Interrupt" die Fortsetzung des Anwendungsprogramms und die Reaktivierung der Interrupts



Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

4 Pegel- und Flanken-gesteuerte Interrupts

- Beispiel: Signal eines Tasters



- Flanken-gesteuert
  - ➤ Interupt wird durch die Flanke (= Wechsel des Pegels) ausgelöst
  - ➤ welche Flanke einen Interrupt auslöst kann bei manchen Prozessoren konfiguriert werden
- Pegel-gesteuert
  - ➤ solange ein bestimmter Pegel anliegt (hier Pegel = GND) wird immer wieder ein Interrupt ausgelöst

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

J.5 Nebenläufigkeit

1 Überblick

- Definition von Nebenläufigkeit:
  zwei Programmausführungen sind nebenläufig, wenn für zwei einzelne Befehle a und b aus beiden Ausführungen nicht feststeht, ob a oder b tatsächlich zuerst ausgeführt wird
- Nebenläufigkeit tritt auf
  - ➤ bei Interrupts
  - ➤ bei parallelen Abläufen (gleichzeitige Ausführung von Code in einem Mehrprozessorsystem mit Zugriff auf den gleichen Speicher)
  - ➤ bei quasi-parallelen Abläufen (wenn ein Betriebssystem verschiedenen Prozesse den Prozessor jeweils für einen Zeitraum zuteilt und ihn nach Ablauf der Zeit wieder entzieht)
- Problem:
  - ➤ was passiert, wenn die nebenläufigen Ausführungen auf die gleichen Daten im Speicher zugreifen?

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2 Nebenläufigkeit durch Interrupts

- Interrupts unterbrechen Anwendungsprogramme "irgendwo"
- Interrupts haben Zugriff auf den gleichen Speicher
- Szenario:
  - ➤ eine Lichtschranke soll Fahrzeuge zählen und alle 10 Sekunden soll der Wert ausgegeben werden

```
int a;

  int main() {
  long i;
  while(1) {
    for (i=0; i<2000000; i++)
    /* Zählen dauert 10 Sek. */;
    print(a);
    a=0;
  }
}
```

```
/* Lichtschranken-
   Interrupt */
int count() {
        a++;
}
```


Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2 Nebenläufigkeit durch Interrupts (2)

- Auf C-Ebene führt die Interrupt-Behandlung nur einen Befehl aus: a++
  - ➤ nur scheinbar ein Befehl
  - ➤ auf Maschinencode-Ebene (Bsp. AVR) sieht die Sache anders aus

```
...
    print(a);
    a=0;
...
```

```
int count() {
        a++;
}
```

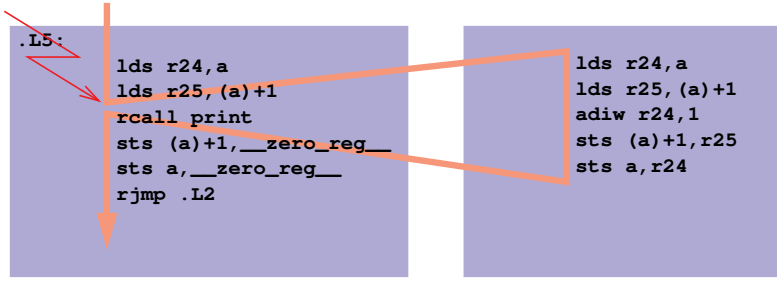
```
...
.L5:
        lds r24,a
        lds r25,(a)+1
        rcall print
        sts (a)+1,__zero_reg__
        sts a,__zero_reg__
        rjmp .L2
...
```

```
...
        lds r24,a
        lds r25,(a)+1
        adiw r24,1
        sts (a)+1,r25
        sts a,r24
...
```


Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2 Nebenläufigkeit durch Interrupts (3)

- Annahme: Interrupt trifft folgendermaßen ein:

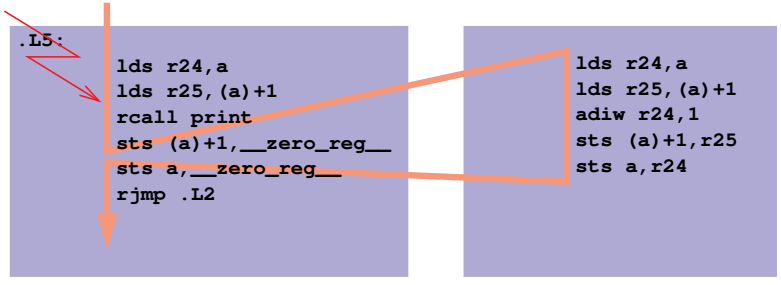


  - ➤ Folge: ein Fahrzeug wird nicht gezählt
- Details des Szenarios zeigen mehrere Problemstellen:
  - ➤ int-Wert wird in zwei Schritten in zwei Register geladen (long: 4 Register)
  - ➤ Operationen erfolgen in Registern, danach wird in Speicher zurückgeschrieben

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2 Nebenläufigkeit durch Interrupts (4)

- Annahme: Interrupt trifft folgendermaßen ein:



  - ➤ Folge: möglicherweise werden 255 Fahrzeuge zuviel gezählt
    - Variable a ist auf 2 Register verteilt →a = 0 nicht atomar zuerst wird obere Hälfte auf 0 gesetzt
    - falls a++ im Interrupt-Handler a zufällig von 255 auf 256 zählt → Bitüberlauf vom "unteren" in's "obere" Register
    - nach Interrupt wird nur noch untere Hälfte auf 0 gesetzt → a = 256

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

2 Nebenläufigkeit durch Interrupts (5)

- weiteres Problem bei Zugriff auf globale Variablen:
  - AVR stellt 32 Register zur Vefügung
  - Compiler optimiert Code und vermeidet Speicherzugriffe wenn möglich
    - ➤ Variablen werden möglichst in Registern gehalten
  - Registerinhalte werden bei Interrupt gesichert und am Ende restauriert
    - ➤ Änderungen der Interrupt-Funktion an einer Variablen gehen beim Restaurieren der Register wieder verloren
- Lösung für dieses Problem:
  - Compiler muss Variablen vor jedem Zugriff aus dem Speicher laden und anschließend zurückschreiben
    - ➤ Attribut `volatile`

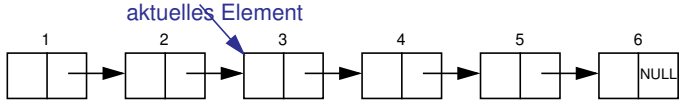
```
volatile int a;
```

  - Nachteil: Code wird umfangreicher und langsamer
    - ➤ nur einsetzen wo unbedingt notwendig!

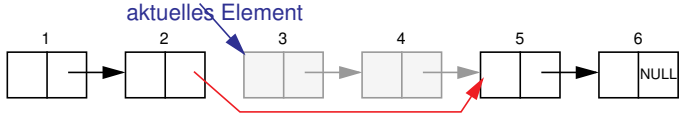
Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

3 Nebenläufigkeitsprobleme allgemein

- Zugriff auf gemeinsame Daten ist bei nebenläufigen Ausführungen generell kritisch
  - ➤ selbst bei einfachen Variablen (siehe vorheriges Beispiel)
  - ➤ Problem bei komplexeren Datenstrukturen
    (z. B. Einketten einer Struktur in verkettete Liste)
    noch gravierender: Datenstruktur kann völlig zerstört werden
- Beispiel: Programm läuft durch eine verkettete Liste



  - Interrupt-Handler oder parallel laufendes Programm entfernt Elemente 3 und 4 und gibt den Speicher dieser Elemente frei



Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

4 Umgang mit Nebenläufigkeitsproblemen

- Gemeinsame Daten möglichst vermeiden
  - ➤ Interrupt-Funktionen sollten weitgehend auf eigenen Daten arbeiten
  - ➤ Parallele Abläufe sollten ebenfalls möglichst eigene Datenbereiche haben
- Kommunikation zwischen Anwendungsabläufen erfordert aber oft gemeinsame Daten
  - ➤ solche Daten sollten deutlich hervorgehoben werden
    z. B. durch entsprechenden Namen

```
volatile int INT_zaehler;
```

    - betrifft nur globale Variablen
    - lokale Variablen sind unkritisch
      (nur in der jeweiligen Funktion sichtbar)
  - ➤ Zugriff auf solche Daten sollte in der Anwendung möglichst begrenzt sein
    (z. B. nur in bestimmten Funktionen,
    gemeinsames Modul mit Interrupt-Handlern, vgl. Kap. D.9-3)

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.

4 Umgang mit Nebenläufigkeitsproblemen (2)

- Zugriffskonflikte mit Interrupt-Handlern verhindern
  - das Programm muss vor kritischen Zugriffen auf gemeinsame Daten Interrupts sperren
    - ➤ Beispiel AVR:
      Funktionen `cli()` (blockiert alle Interrupts)
      und `sei()` (erlaubt Interrupts)
  - in dieser Zeit können Interrupts verloren gehen

➥ Zeitraum von Interruptsperren muss möglichst kurz bleiben!

  - es kann sinnvoll sein, nur Interrupts des Geräts zu sperren, dessen Handler auch auf die kritischen Daten zugreift
    (hängt von Details der Hardware ab!)
- Zugriffskonflikte bei parallelen Abläufen
  - spezielle atomare Maschinenbefehle
    (z. B. test-and-set oder compare-and-swap bei Intel-Architekturen)
  - Software-Synchronisation (lock-Variablen, Semaphore, etc.)
  - Kommunikation mittels Nachrichten statt gemeinsamer Daten

Reproduktion jeder Art oder Verwendung dieser Unterlage, außer zu Lehrzwecken an der Universität Erlangen-Nürnberg, bedarf der Zustimmung des Autors.