

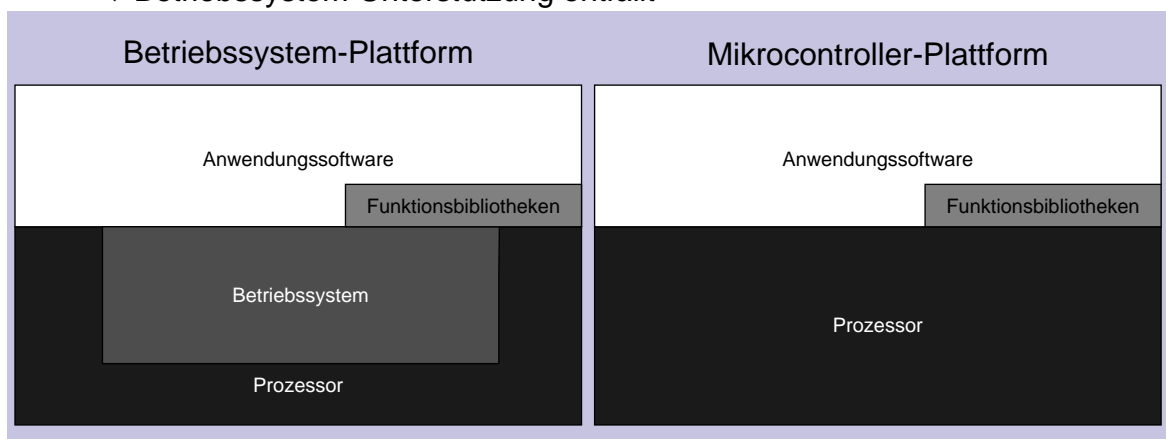
J Mikrocontroller-Programmierung

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

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

1 Betriebssystemunterstützung

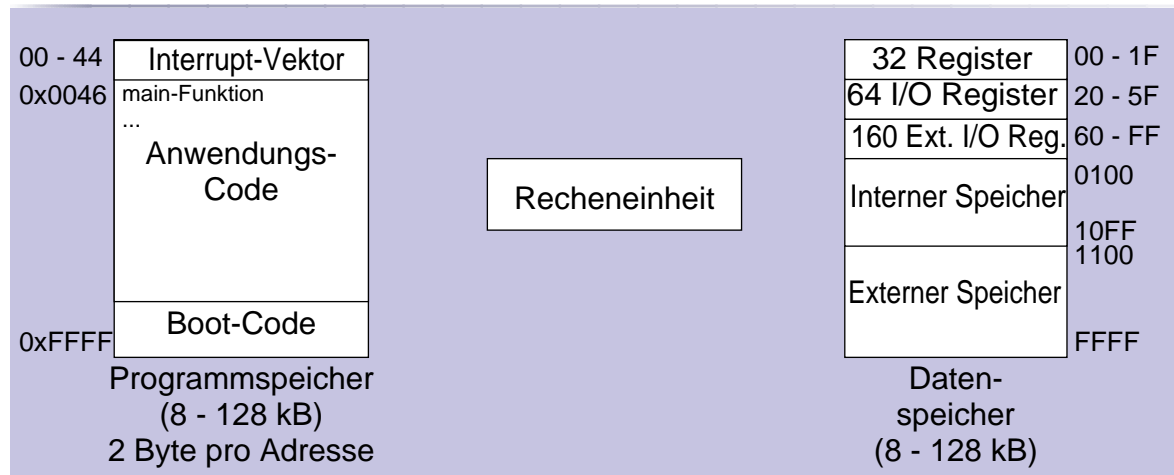
- Prozesse als Ausführungsumgebung für Programme
 - ◆ Erzeugen von Prozessen, Starten von Programmen
 - ◆ Ausführung mehrerer Prozesse quasi-gleichzeitig
 - ◆ Überwachung der Prozesse (z. B. beim Speicherzugriff), notfalls Abbrechen
- Dateisystem zur Abstraktion von Speichermedien und Peripheriegeräten
 - ◆ 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

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

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

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)

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

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

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

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

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**)

1 Motivation (2)

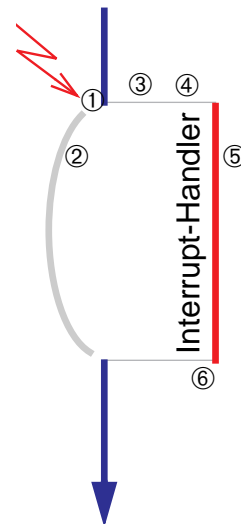
- Polling vs. Interrupts: Vor und Nachteile
 - + Pollen erfolgt **synchron** zum Programmablauf, Programm ist in dem Moment auf das Ereignis vorbereitet
 - Interrupts unterbrechen den Programmablauf irgendwo (**asynchron**), sie könnten in dem Augenblick stören
 - ➔ durch die Interrupt-Bearbeitungsteht **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 Programmablauf eingestreut — und hat mit der "eigentlichen" Funktionalität dort meist nichts zu tun

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

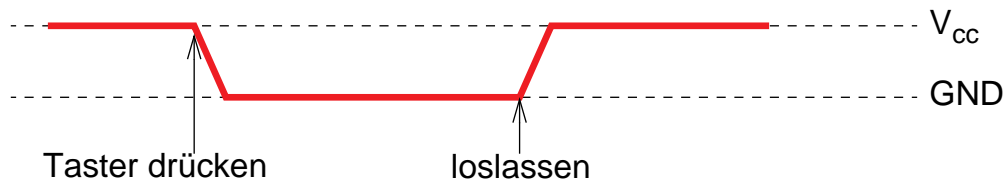
3 Ablauf

- 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



4 Pegel- und Flanken-gesteuerte Interrupts

■ Beispiel: Signal eines Tasters



■ Flanken-gesteuert

- Interrupt 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

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?

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++;
}
```

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;
...
```

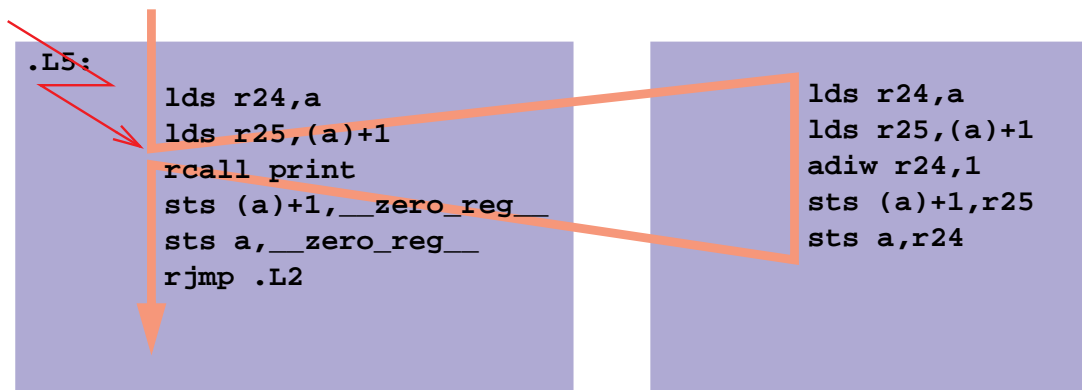
```
int count() {
    a++;
}
```

```
...
.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
...
```

2 Nebenläufigkeit durch Interrupts (3)

- Annahme: Interrupt trifft folgendermaßen ein:



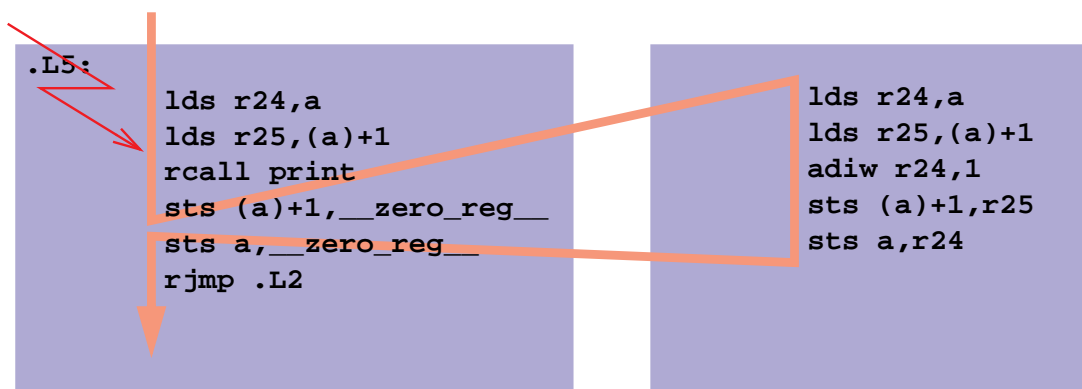
- Folge: ein Fahrzeug wird nicht gezählt

- 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

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

2 Nebenläufigkeit durch Interrupts (5)

- weiteres Problem bei Zugriff auf globale Variablen:
 - ◆ AVR stellt 32 Register zur Verfügung
 - ◆ 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`

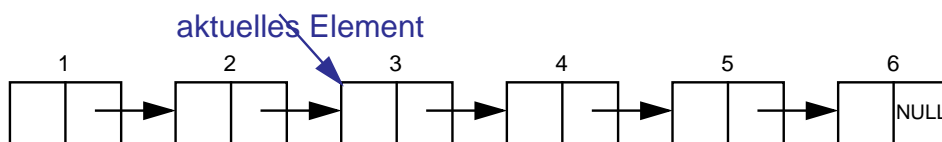
```
volatile int a;
```

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

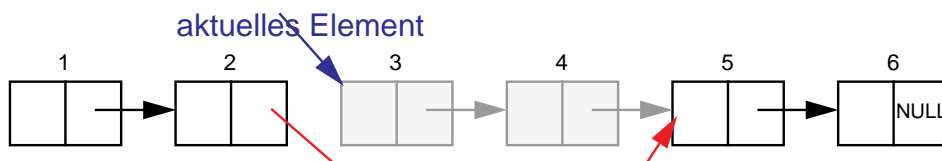
3 Nebenläufigkeitsprobleme allgemein

- 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



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_zaeher;`

 - 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)

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 Interruptsperrern 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